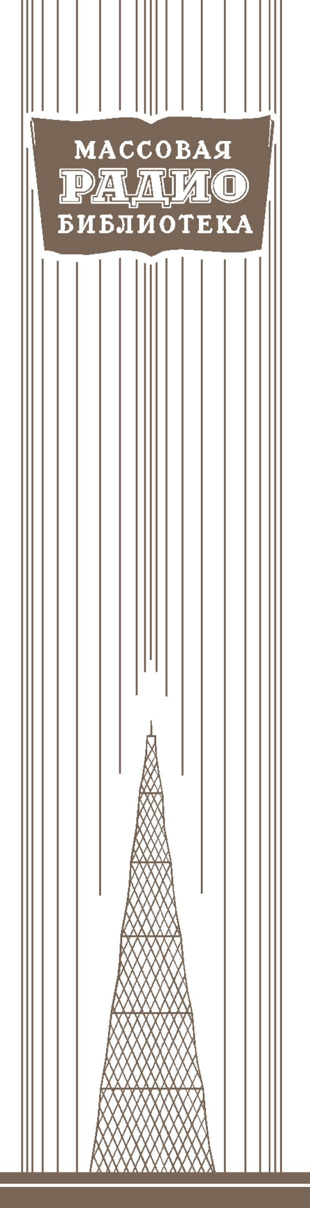
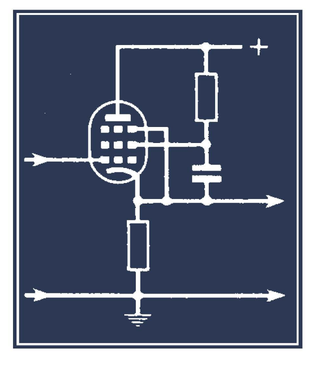


Л. Б. КАМИНИР

КАТОДНЫЙ ПОВТОРИТЕЛЬ



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ
1955



МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 226

Л. Б КАМИНИР

КАТОДНЫЙ ПОВТОРИТЕЛЬ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА 1955 ЛЕНИНГРАД

В брошюре рассматриваются принцип работы, основные особенности и области применения катодного повторителя.

Брошюра рассчитана на подготовленного радиолюбителя.

СОДЕРЖАНИЕ

Автор — *Каминир Лев Борисович*

КАТОДНЫЙ ПОВТОРИТЕЛЬ

Редактор *К. А. Шульгин* Технический редактор *К. П. Воронин*

Сдано в набор 19/IV 1955 г. Подписано к печати 22/VI 1955 г. Г-05232.
Бумага $84 \times 108^1/_{32}$ 2,87 печ. л. Уч.-изд. л. 3.
Тираж 25 000 экз. Цена 1 р. 20 к. Заказ 184

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА КАТОДНОГО ПОВТОРИТЕЛЯ

Катодный повторитель благодаря своей простоте и ряду преимуществ перед усилителями, выполненными по другим схемам, получил широкое распространение. Он применяется в самых разнообразных устройствах различных отраслей радиотехники и электроники.

Для того, чтобы легче было уяснить особенности катодного повторителя, рассмотрим основные свойства существующих усилителей.

Если построить несколько усилительных каскадов по различным схемам включения установленной в них электронной лампы, а сопротивления нагрузки выбрать одинаковыми, то окажется, что вследствие различной связи между входным и выходным напряжениями и напряжениями на электродах лампы свойства усилительного каскада будут коренным образом зависеть от выбора общей точки.

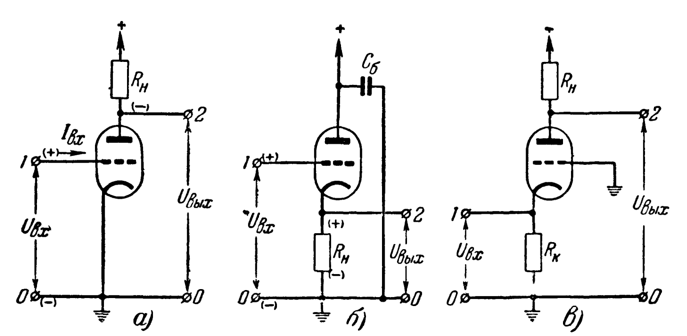
Общей точкой называется та часть схемы, к которой подключается ее один входной и один выходной зажимы, а также один из электродов лампы. Эта точка обычно соединяется с шасси устройства и приобретает нулевой потенциал, поэтому ее часто называют „нулевой“ точкой.

Схемы трех различных усилительных каскадов, отличающихся друг от друга выбором общей точки, показаны на фиг. 1. При одном и том же сопротивлении нагрузки основные параметры (коэффициент усиления, входное и выходное сопротивления и ширина полосы пропускания) у этих усилителей оказываются различными.

Величина коэффициента усиления не всегда играет решающую роль при выборе схемы усилителя. Часто основным параметром, определяющим возможность применения той или иной схемы, является величина входного и выходного сопротивлений.

Если ко входу усилителя подвести переменное напряжение $U_{вх}$ (фиг. 1), то по проводу, идущему от зажима *1*, потечет переменный ток $I_{вх}$. Отношение $\frac{U_{вх}}{I_{вх}}$ численно равно входному сопротивлению каскада, нагружающему источник сигнала, к которому подключен усилитель

Со стороны выхода каскад можно рассматривать как генератор электрических колебаний усиливаемого сигнала. Но не весь усиленный сигнал поступает на нагрузку. Вследствие падения части напряжения внутри каскада



Фиг. 1. Возможные способы включения нагрузки в цепь электронной лампы

а — схема с общим катодом, *б* — схема с общим анодом, *в* — схема с общей сеткой

напряжение на его выходе оказывается меньше его э д с Величина этого падения определяется значением выходного сопротивления усилителя.

Наиболее широкое применение получили усилители, собранные по схеме с общим катодом (фиг. 1,*а*). Объясняется это тем, что такие усилители имеют большой коэффициент усиления. Однако они обладают сравнительно небольшим входным и высоким выходным сопротивлением, что в ряде случаев оказывается неприемлемым.

На фиг 1,*б* изображена схема усилителя с общим анодом или, как его принято называть, катодного повторителя. Для переменной составляющей анодного тока, вызываемой напряжением сигнала на входе каскада, анод лампы практически накоротко соединен с точкой схемы, имеющей нулевой потенциал (благодаря малому внутреннему сопротивлению источника питания или при помощи конденсатора достаточно большой емкости).

В технике сантиметровых волн и измерительной технике, когда необходимо, чтобы усилитель обладал малым уровнем собственных шумов и малой проходной емкостью катод — анод лампы, его собирают по схеме с заземленной сеткой (фиг. 1,*в*). Особенностью такого усилителя является очень малое входное и большое выходное сопротивление.

Рассмотрим прохождение сигнала через усилитель с общим катодом и катодный повторитель. Пусть в рассматриваемый момент времени напряжение на входе усилителя с общим катодом (фиг 1,*а*) и катодного повторителя (фиг. 1,*б*) увеличивается (потенциал точки *1* растет по отношению к потенциалу точки *0*). Это вызовет возрастание тока через лампу и, следовательно, увеличение падения напряжения на сопротивлении нагрузки $R_н$. Так как напряжение источника анодного питания неизменно, то при увеличении напряжения на сопротивлении $R_н$ падение напряжения на лампе уменьшается. В усилителе с общим катодом это приводит к уменьшению потенциала точки *2* относительно потенциала точки *0*. Таким образом, фаза напряжения на выходе каскада здесь противоположна фазе напряжения на входе. В катодном же повторителе возрастание падения напряжения на сопротивлении нагрузки $R_н$ вызывает увеличение потенциала точки *2* относительно потенциала точки *0*. Следовательно, в отличие от каскада с общим катодом здесь фазы напряжений на входе и выходе совпадают Напряжение на выходе такого каскада как по величине, так и по фазе как бы повторяет входное напряжение. Это и дало основание называть его „катодным повторителем". Входное и выходное сопротивления катодного повторителя резко отличаются от соответствующих параметров обычного усилителя с общим катодом, что и обусловливает основные преимущества и применения катодного повторителя.

Известно, что введение в усилитель отрицательной обратной связи, т. е. подача напряжения с его выхода на вход в противофазе к подводимому напряжению, меняет основные параметры усилителя: входное и выходное сопротивления, коэффициент усиления, частотную и фазовую характеристики. Чем больше обратная связь, тем сильнее сказывается ее влияние. В катодном повторителе выходное напряжение $U_{вых}$ полностью вводится

обратно в цепь управляющей сетки лампы, т. е. в нем имеет место 100%-ная обратная связь. Поэтому ее свойства проявляются здесь особенно ярко. Рассмотрим это подробнее.

Выше уже отмечалось, что напряжение на выходе катодного повторителя совпадает по фазе с напряжением на его входе. Из фиг. 2 видно, что напряжение $U_{ск}$, которое прилагается между сеткой и катодом лампы и управляет ее анодным током, равно не напряжению сигнала $U_{вх}$, а разности между ним и напряжением на выходе $U_{вых}$:

$$U_{ск} = U_{вх} - U_{вых}. \tag{1}$$

Фиг. 2. Принципиальная схема катодного повторителя (знаки напряжения $U_{вх}$ и $U_{вых}$ даны для некоторого определенного момента времени).

Как известно, напряжение на сопротивлении нагрузки связано с напряжением на сетке лампы следующим образом:

$$U_{вых} = U_{ск} \cdot \mu \frac{R_н}{R_i + R_н},$$

где μ — коэффициент усиления лампы, а R_i — ее внутреннее сопротивление (шунтирующее действие конденсатора $C_н$ пока не будем учитывать; оно будет рассмотрено позже). Подставляя в формулу (1) значение $U_{вых}$, получим:

$$U_{ск} = U_{вх} - U_{ск} \cdot \mu \cdot \frac{R_н}{R_i + R_н},$$

откуда

$$U_{ск} = \frac{U_{вх}}{1 + \frac{\mu R_н}{R_i + R_н}}. \tag{2}$$

Коэффициент усиления каскада из выражения (1)

$$K = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{U_{вх} - U_{ск}}{U_{вх}}. \tag{3}$$

Подставляя в выражение (3) значение отношения $\frac{U_{ск}}{U_{вх}}$ из выражения (2), получим, что

$$K = 1 - \frac{1}{1 + \frac{\mu R_н}{R_i + R_н}} = \frac{\mu R_н}{R_i + R_н(1+\mu)}. \qquad (4)$$

Разделив числитель и знаменатель на $(1+\mu)$, имеем:

$$K = \frac{\frac{\mu}{1+\mu} \cdot R_н}{R_н + \frac{R_i}{1+\mu}}.$$

Обозначим $\mu' = \frac{\mu}{1+\mu}$, а $R_i' = \frac{R_i}{1+\mu}$ получаем окончательное выражение для коэффициента усиления катодного повторителя

$$K = \frac{\mu' R_н}{R_i' + R_н}.$$

Коэффициент усиления усилителя с общим катодом, как известно, равен·

$$K_{ок} = \frac{\mu R_н}{R_i + R_н}.$$

Сравнение обеих формул позволяет рассматривать μ' и R_i' как параметры некоторой эквивалентной лампы.

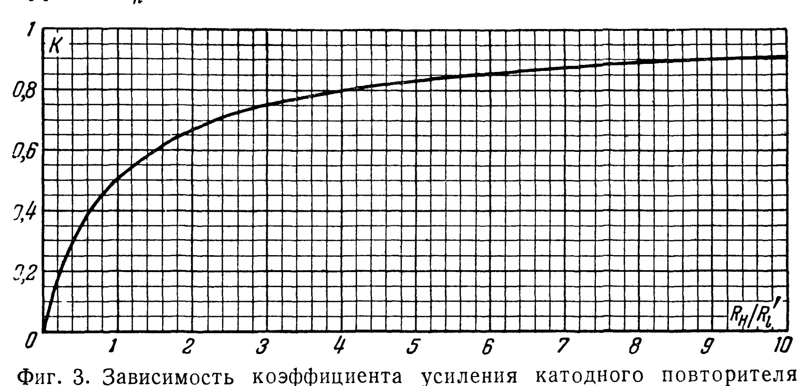
Эквивалентный коэффициент усиления лампы μ' и эквивалентное внутреннее сопротивление лампы R_i' оказываются в $1+\mu$ раз меньше соответственно коэффициента усиления лампы μ и внутреннего сопротивления R_i. Для большинства типов ламп μ равно нескольким десяткам или сотням. Поэтому μ' очень близко к единице. Следовательно, формулу для коэффициента усиления можно переписать следующим образом:

$$K \approx \frac{R_н}{R_i' + R_н}.$$

Отсюда ясно, что коэффициент усиления катодного повторителя всегда меньше единицы. Поэтому правильнее было бы называть K не коэффициентом усиления, как

это делается по традиции, а коэффициентом передачи напряжения, так как усиления по напряжению в катодном повторителе не происходит, а происходит уменьшение уровня сигнала

При использовании катодного повторителя обычно желательно получить минимальное уменьшение уровня сигнала. Для этого в нем нужно применить такую лампу, при которой эквивалентное внутреннее сопротивление R_i' получается значительно меньше сопротивления нагрузки $R_н$.



Фиг. 3. Зависимость коэффициента усиления катодного повторителя от отношения $\frac{R_н}{R_i'}$.

На фиг. 3 дан график зависимости коэффициента усиления от отношения $\frac{R_н}{R_i'}$. Из кривой видно, что при малых $\frac{R_н}{R_i'}$ изменение этого соотношения заметно меняет коэффициент усиления и, наоборот, при больших $\frac{R_н}{R_i'}$ коэффициент усиления меняется незначительно и мало зависит от сопротивления нагрузки.

В конце брошюры приведены номограммы, позволяющие определить коэффициент усиления каскада при заданных параметрах лампы и сопротивлении нагрузки $R_н$.

Как видно из формулы для R_i', эквивалентное внутреннее сопротивление лампы, работающей в катодном повторителе, резко уменьшается. Если пренебречь еди-

ницей по сравнению с μ, то формула для эквивалентного внутреннего сопротивления лампы примет вид:

$$R_i' = \frac{R_i}{\mu}.$$

Основные параметры лампы связаны между собой следующим образом:

$$\frac{R_i}{\mu} = \frac{1}{S},$$

где S — крутизна характеристики лампы. Таким образом,

$$R_i' = \frac{1}{S}.$$

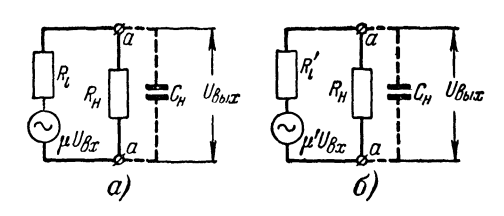
Следовательно, чтобы ослабление напряжения катодным повторителем было возможно меньшим, в нем следует применять лампу с большой крутизной характеристики, например пентод.

Если крутизну характеристики S выразить в амперах на вольт, то эквивалентное внутреннее сопротивление лампы R_i', равное $\frac{1}{S}$, будет выражено в омах. Например: крутизна характеристики высокочастотного пентода типа 6Ж4 $S = 9$ *ма/в*. Эквивалентное внутреннее сопротивление той же лампы, работающей в схеме катодного повторителя, будет $R_i' = \frac{1}{S} = \frac{1}{9 \cdot 10^3} = 111$ *ом*. Внутреннее сопротивление лампы 6Ж4 в обычном режиме составляет около 1 *мгом*. Таким образом, при использовании этой лампы в катодном повторителе ее внутреннее сопротивление уменьшается почти в 10 000 раз.

Уменьшение внутреннего сопротивления лампы является важнейшим свойством катодного повторителя, обусловившим ряд его практических применений. Физически оно объясняется следующим. Колебание напряжения на нагрузке вызывает изменение анодного тока, протекающего через лампу, не только вследствие изменения анодного напряжения (так называемая „реакция анода“), но главным образом в результате изменения напряжения на сетке. Следовательно, то же изменение напряжения на нагрузке катодного повторителя вызывает значительно большее изменение анодного тока, чем в схеме усилителя

с общим катодом, т. е. внутреннее сопротивление лампы в первом случае оказывается во много раз меньшим.

На фиг. 4 изображены эквивалентные схемы усилителя с общим катодом и катодного повторителя. К выходным зажимам *аа* эквивалентного генератора с э. д. с., равной $\mu U_{вх}$ в первом случае и $\mu' U_{вх}$ во втором, и внутренними сопротивлениями соответственно R_i и R_i' подключена нагрузка $R_н$. Влиянием паразитной емкости $C_н$, включенной параллельно $R_н$, пока пренебрегаем. Тогда выходное сопротивление каскада $R_{вых}$ будет равно сопротивлению параллельно включенных $R_н$ и действующего внутреннего сопротивления лампы.



Фиг. 4. Эквивалентные схемы.
а — усилителя с общим катодом, *б* — катодного повторителя.

В усилителе с общим катодом шунтирующее действие внутреннего сопротивления лампы R_i не сказывается или сказывается мало, так как оно велико. Наоборот, в катодном повторителе R_i' сильно шунтирует нагрузку. Поэтому выходное сопротивление катодного повторителя, равное

$$R_{вых} = \frac{R_i' \cdot R_н}{R_i' + R_н},$$

во многих случаях достигает лишь нескольких десятков ом. Так как $R_i' = \frac{1}{S}$, то формулу для $R_{вых}$ часто выражают следующим образом:

$$R_{вых} = \frac{R_н}{1 + SR_н}.$$

При больших значениях $R_н$ выходное сопротивление катодного повторителя очень мало зависит от сопротивления нагрузки.

Для удобства вычислений на стр. 52 приведена номограмма для определения $R_{вых}$ в зависимости от крутизны характеристики лампы и сопротивления нагрузки.

Рассмотрим теперь другой важный параметр катодного повторителя — входное сопротивление. В ряде случаев необходимо, чтобы источник сигнала работал в режиме холостого хода. Для этого входное сопротивление системы, на которую он работает, должно быть возможно большим. Если пренебречь током, протекающим через емкостное сопротивление участка сетка—анод лампы (что вполне допустимо вследствие малой величины этой емкости), и ее сеточным током, то окажется, что входное сопротивление катодного повторителя определится емкостью сетка — катод и сопротивлением утечки сетки лампы.

Представление о сопротивлении связано с величиной тока, который протекает по цепи при данном приложенном к этой цепи напряжении. Чем меньше ток, тем больше сопротивление этой цепи. Ток $I_{вх}$, потребляемый катодным повторителем и протекающий через емкость сетка — катод лампы $C_{ск}$ (фиг. 2), значительно меньше, чем ток, протекающий через ту же емкость в усилителе с общим катодом. Связано это с тем, что к емкости $C_{ск}$ приложено не все напряжение $U_{вх}$, как это имеет место во втором случае, а разность между напряжением $U_{вх}$ и падением напряжения $U_{вых}$ на нагрузке. Это уменьшение тока можно трактовать как увеличение входного сопротивления или, что то же самое, как уменьшение емкости $C_{ск}$, так как емкостное сопротивление тем больше, чем меньше емкость.

Увеличение емкостного сопротивления, как и сопротивления утечки R_c, если оно включено между сеткой и катодом лампы, происходит в $\frac{1}{1-K}$ раз. Например, при коэффициенте усиления каскада $K = 0{,}9$ это увеличение равно десяти.

В связи с тем, что катодный повторитель обладает большим входным и малым выходным сопротивлением,

его можно использовать в качестве лампового трансформатора сопротивлений

Катодный повторитель обладает очень хорошими частотной и фазовой характеристиками, позволяющими передать без искажений весьма широкую полосу частот — от нескольких герц до нескольких мегагерц Объясняется это следующим. Обычно полоса равномерно усиливаемых частот ограничивается шунтирующим действием выходной емкости $C_н$ Влияние одной и той же емкости различно в усилителе с общим катодом и катодном повторителе. В первом случае (фиг. 4,*а*) напряжение эквивалентного генератора распределяется между комплексным сопротивлением нагрузки и большим внутренним сопротивлением R_i генератора, а во втором — между той же нагрузкой и сравнительно малым внутренним сопротивлением R_i' эквивалентного генератора. Естественно, что в последнем падение напряжения на внутреннем сопротивлении генератора сказывается во много раз меньше, чем в первом. Это означает, что при такой же нагрузке $R_н$, как и у усилителя с общим катодом, понижение коэффициента усиления (западание характеристики в области верхних частот), происходящее из-за уменьшения емкостной составляющей сопротивления нагрузки, у катодного повторителя получится на значительно более высокой частоте При одинаковой верхней граничной частоте $f_в$ данное западание частотной характеристики у катодного повторителя происходит при значительно большей емкости $C_н$, шунтирующей нагрузку. Численно выигрыш в допустимом увеличении емкости для большинства практических случаев получается в $(1+SR_н)$ раз.

Линейность частотной и фазовой характеристик катодного повторителя в широком диапазоне частот обеспечивает точное воспроизведение передаваемого им импульса. Другими словами, катодный повторитель обладает хорошей переходной характеристикой.

Катодный повторитель часто используется в качестве выходного (оконечного) каскада. При конструировании радиоаппаратуры важно знать максимальную амплитуду напряжения, которая может быть получена от такого каскада. Она определяется произведением возможного

приращения анодного тока лампы ΔI_a в пределах рабочего участка ее характеристики на сопротивление нагрузки $R_н$, т. е. $U_н = \Delta I_a \cdot R_н$. В свою очередь выбор величины сопротивления нагрузки при заданном значении $C_н$ связан с шириной полосы частот, пропускаемых усилителем. Чем шире эта полоса, тем меньшим должно быть $R_н$ и тем, следовательно, меньшее напряжение может быть получено на выходе каскада при помощи данной лампы.

Так как ширина полосы пропускания усилителя и амплитуда напряжения на его выходе связаны между собой, то для сравнения различных схем и типов ламп вводят критерий, показывающий, какое максимальное напряжение можно получить от каскада при заданной полосе частот. Он представляет собой произведение максимально возможной амплитуды выходного напряжения на верхнюю граничную частоту полосы пропускания усилителя $f_в$.

Для одной и той же лампы и параметров нагрузки $R_н$ и $C_н$ это произведение для катодного повторителя в $(1 + SR_н)$ раз больше, чем для усилителя с общим катодом. Объяснить это можно таким образом. Так как при заданных емкости $C_н$ и полосе пропускания в катодном повторителе можно взять значительно большее сопротивление нагрузки $R_н$, чем в усилителе с общим катодом, то при одной и той же лампе катодный повторитель дает возможность получить значительно большее напряжение на выходе, чем усилитель с общим катодом. Поэтому, чтобы получить требуемое напряжение на выходе в заданной полосе частот, в катодном повторителе можно использовать менее мощную лампу, чем в усилителе с общим катодом.

Для катодного повторителя характерно то, что благодаря уменьшению напряжения, действующего на участке сетка—катод лампы, к его входу можно подводить переменное напряжение, значительно превышающее максимальное напряжение, при котором лампа работает еще без искажений в каскадах, собранных по другим схемам. Отношение максимальной амплитуды напряжения, допустимой для данного типа лампы, к напряжению, которое можно подавать при ее использовании в катодном повторителе $\frac{U_{вх.макс.кп}}{U_{вх.макс}} = 1 + SR_н$, т. е. тем больше,

чем больше сопротивление нагрузки и крутизна характеристики лампы. Например: для лампы 6Ж4 при сопротивлении нагрузки, равном 1 *ком*, допустимая амплитуда напряжения на входе катодного повторителя получается примерно в 10 раз большей, чем при использовании этой лампы в усилителе с общим катодом. Таким образом, катодный повторитель может работать без искажений при больших напряжениях на входе.

Следует отметить, что при работе на частотах, на которых сопротивление шунтирующей емкости $C_н$ оказывается сравнимым с активным сопротивлением нагрузки $R_н$, максимальная допустимая амплитуда напряжения на входе каскада быстро снижается. Это иногда упускают из виду.

Максимальное напряжение, подводимое ко входу каскада, при котором лампа еще не перегружается, зависит от напряжения

$$U_{ск} = U_{вх} - U_{вых}.$$

Напряжение $U_{вых}$ на достаточно низкой частоте представляет собой произведение максимального приращения анодного тока, при котором лампа еще не перегружается, на сопротивление нагрузки $R_н$. С ростом частоты в результате шунтирующего действия емкости $C_н$ сопротивление нагрузки $Z_н$ падает. Так как ток больше не может быть увеличен без того, чтобы не возникли искажения, то напряжение $U_{вых}$ падает и уменьшается действие отрицательной обратной связи. Поэтому, для того чтобы напряжение $U_{ск}$, приложенное между сеткой и катодом лампы, осталось прежним, необходимо уменьшить уровень сигнала на входе усилителя. Если его оставить тем же самым, то лампа перегрузится. Следовательно, линейность в широком диапазоне амплитудно-частотной характеристики, определяемая главным образом внутренним сопротивлением R'_i, не означает, что в том же диапазоне будет постоянной величина максимально допустимого входного напряжения, так как последнее зависит не от R'_i, а связано с величиной полного сопротивления нагрузки $Z_н$.

При постоянном максимально допустимом токе лампы, как максимально допустимое входное, так и выходное напряжения будут меняться в зависимости от частоты по

тому же закону, что и полное сопротивление нагрузки $\dot{Z}_н$. В том случае, когда сопротивление $Z_н$ носит не емкостный, а индуктивный характер и растет с частотой, соответственно будет расти и максимально допустимое входное напряжение.

Указанные обстоятельства, в частности, важно иметь в виду при передаче импульсов. В то время как для низкочастотных составляющих спектра импульса нагрузка является чисто активной, для высокочастотных составляющих, связанных с передачей фронтов импульса, вследствие шунтирующего действия $C_н$ сопротивление нагрузки становится комплексным и оказывается много меньше, чем для низкочастотных составляющих. В результате при передаче импульса могут иметь место искажения, вызываемые перегрузкой каскада на верхних частотах и не связанные с частотной характеристикой усилителя.

В конце брошюры дана номограмма, позволяющая определить необходимое снижение амплитуды импульса по сравнению с допустимой амплитудой синусоидального напряжения низкой частоты, т. е. напряжения, для которого нагрузку катодного повторителя можно считать чисто активной.

Перейдем к рассмотрению вопроса о стабильности работы катодного повторителя. Как известно, применение отрицательной обратной связи приводит к тому, что усиление мало зависит от изменений параметров ламп с течением времени, колебаний напряжений источников питания и т. д. Естественно, что коэффициент усиления катодного повторителя при K, близком к единице, практически не зависит от изменений перечисленных выше факторов. Если же нагрузка катодного повторителя очень мала и коэффициент усиления K заметно понижен, то его стабильность получается несколько меньшей, но все же остается достаточно хорошей.

Одним из следствий сказанного выше является низкая чувствительность катодного повторителя к влиянию переменной составляющей анодного напряжения (вызываемой недостаточной фильтрацией напряжения источника питания). Об этом полезно помнить, например, в том случае, когда устройство, на выходе которого стоит катодный повторитель, питается от выпрямителя с электронной стабилизацией. Катодный повторитель, в котором применяется сравнительно мощная лампа, потребляющая большой ток,

следует питать не от общего выходного зажима выпрямителя, а непосредственно от дросселя фильтра до элементов электронной стабилизации.

Подытожим основные свойства катодного повторителя:

1. Фаза напряжения на выходе катодного повторителя совпадает с фазой напряжения на его входе.

2. Коэффициент усиления катодного повторителя не превышает единицы и обычно меньше ее. Поэтому уровень сигнала, подаваемого на вход катодного повторителя, должен быть несколько выше напряжения, которое нужно получить на его выходе. В ряде случаев это является существенным недостатком.

3. Коэффициент усиления катодного повторителя очень стабилен и практически не меняется при изменении напряжения источников питания и параметров лампы со временем.

4. Входное сопротивление катодного повторителя велико, а входная емкость мала.

5. Катодный повторитель обладает низким выходным сопротивлением.

6. Катодный повторитель имеет очень хорошие частотную, фазовую и переходную характеристики.

7. Сопротивление нагрузки катодного повторителя может быть заземлено с одного конца.

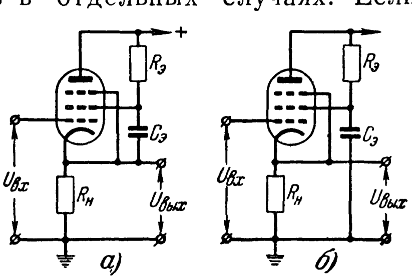
Указанные свойства катодного повторителя и явились причиной его широкого применения.

ВЫБОР РЕЖИМА РАБОТЫ КАТОДНОГО ПОВТОРИТЕЛЯ

В катодном повторителе применяют как триоды, так тетроды и пентоды. Если использовать тетрод или пентод, то точка подключения конденсатора $C_э$ (фиг. 5), блокирующего экранную сетку лампы, определит режим ее работы. В первом случае (фиг. 5,*а*), когда конденсатор подключен между экранной сеткой и катодом лампы, она работает в нормальном пентодном режиме. Если же второй конец конденсатора присоединен к общему нулевому проводу, то для переменной составляющей тока анод и экранная сетка оказываются соединенными между собой накоротко и лампа работает в триодном режиме (фиг. 5,*б*).

Рассмотрим схемы подачи отрицательного смещения на управляющую сетку лампы катодного повторителя. В отличие от усилителя с общим катодом, где способ подачи смещения не меняет свойств каскада, в катодном повторителе от него заметно зависят характеристики его входной, а в некоторых случаях и выходной цепей.

Обычно напряжение, возникающее на нагрузке под действием постоянной составляющей анодного тока I_{a_0}, не равно необходимому напряжению смещения. Поэтому использование сопротивления нагрузки одновременно в качестве сопротивления автоматического смещения (фиг. 6,*а*) возможно лишь в отдельных случаях. Если напряжение на сопротивлении $R_н$ превышает необходимое напряжение смещения, то применяют другую схему. На схеме фиг. 6,*б* сопротивление делителя R_1R_2 подбирается таким, чтобы падение напряжения от источника анодного питания на сопротивлении R_2 было меньше падения напряжения на сопротивлении $R_н$ на величину, равную требуемому напряжению смещения:



Фиг. 5. Возможные способы включения пентода в катодном повторителе.

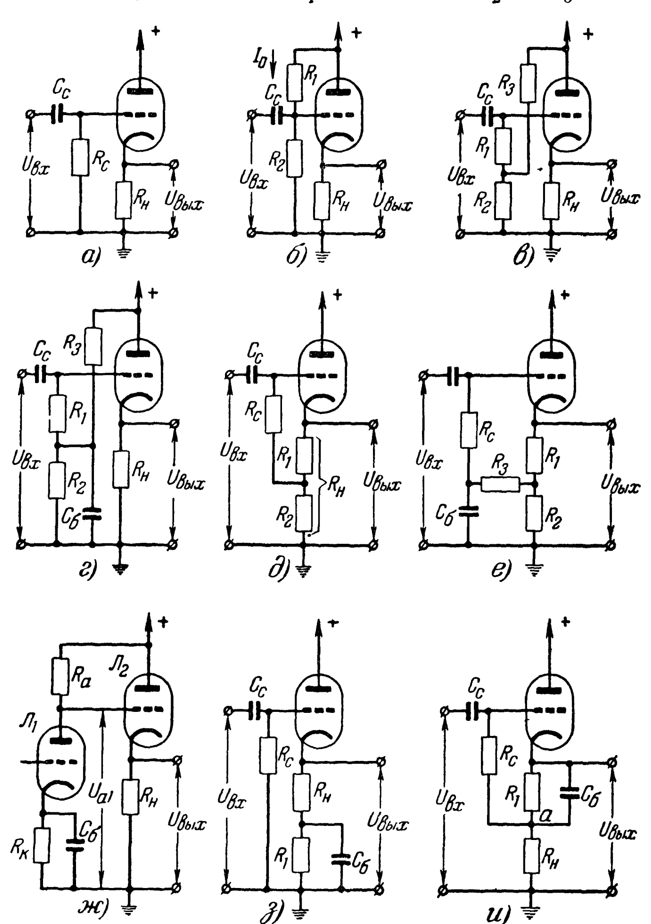
а — пентодный режим; *б* — триодный режим.

$$U_{см} = I_{a_0} \cdot R_н - I_0 \cdot R_2.$$

Сопротивление утечки R_c, нагружающее источник сигнала, здесь равно результирующему сопротивлению параллельно включенных R_1 и R_2. Это нужно иметь в виду, так как постоянная времени входной цепи усилителя R_cC_c определяет полосу пропускания каскада в области нижних частот. Чем это произведение больше, тем более низкие частоты будут без искажения пропускаться усилителем. Для того чтобы усилитель имел хорошую частотную характеристику и не нагружал источник анодного напряжения заметным дополнительным током, сопротивления R_1 и R_2 должны быть достаточно большими: R_2 — несколько мегом, а R_1 — несколько десятков мегом.

На фиг. 6,*в* приведен другой вариант рассмотренной схемы, отличающейся тем, что в нем используется неза-

висимый делитель напряжения R_3R_2. Сопротивлением утечки R_c здесь является сумма сопротивления R_1 и параллельно соединенных сопротивлений R_2 и R_3.



Фиг. 6. Различные способы подачи отрицательного смещения на управляющую сетку лампы катодного повторителя.

Если источником анодного напряжения служит выпрямитель, фильтрация которого недостаточна, то для того, чтобы предотвратить проникновение на сетку лампы переменной составляющей этого напряжения, сопротивление R_2 блокируют конденсатором, как показано на фиг. 6,*г*.

Широкое распространение получила схема фиг. 6,*д*. Здесь сопротивление нагрузки $R_н$ разделено на две части: R_1 и R_2. R_1 выбирается таким, чтобы образующееся на нем напряжение было равно требуемому напряжению смещения. Подать смещение можно также при помощи развязывающего фильтра, как показано на фиг. 6,*е*. Реактивное сопротивление конденсатора $C_б$ на наиболее низкой частоте рабочего диапазона должно быть в 8—10 раз меньше сопротивления R_3. Подобный же фильтр может быть использован при подаче смещения по схеме фиг. 6,*и*.

В отдельных случаях, когда сопротивление нагрузки может быть достаточно большим, связь катодного повторителя с предыдущим каскадом можно осуществить без переходного конденсатора C_c и сопротивления утечки R_c. Подобная схема приведена на фиг. 6,*ж*. Падение напряжения на нагрузке $R_н$ должно превышать постоянное напряжение на аноде лампы $Л_1$ на величину рабочего смещения.

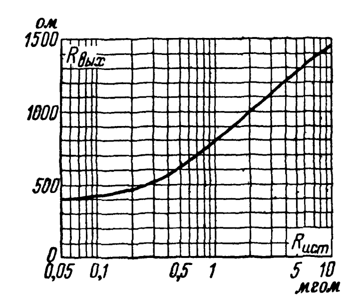
Тогда, когда $R_н$ мало и падение напряжения на нагрузке недостаточно для получения необходимого смещения, последовательно с нагрузкой включают дополнительное сопротивление R_1, зашунтированное конденсатором $C_б$ (фиг. 6,*з*).

На фиг. 6,*и* приведена схема катодного повторителя, в котором сопротивление нагрузки исключено из цепи автоматического смещения и выбор $R_н$ не изменяет положения рабочей точки на характеристике лампы. Сопротивление автоматического смещения R_1 здесь замкнуто накоротко для переменной составляющей анодного тока конденсатором $C_б$. Емкость этого конденсатора, так же как и у каскада, изображенного на фиг. 6,*з*, выбирается такой, чтобы его сопротивление на низшей рабочей частоте было в 8—10 раз меньше шунтирующего сопротивления.

На схеме фиг. 6,*и* точка *а*, к которой подключено сопротивление утечки сетки R_c, имеет для переменной составляющей тот же потенциал, что и катод лампы. Поэтому динамическое входное сопротивление каскада увеличивается в $\frac{1}{1-K}$ раз. Следовательно, в то же число раз возрастает и постоянная времени входной цепи. Это с успехом используется в усилителях, в которых необхо-

димо передать очень низкие частоты. Увеличение динамического входного сопротивления имеет значение также в тех случаях, когда требуется, чтобы каскад обладал большим входным сопротивлением. Например, при выполнении ряда измерений для исключения влияния измеряющего устройства на входе последнего ставят катодный повторитель, в котором напряжение смещения подается, как показано на схеме фиг. 6,*и*.

Увеличение постоянной времени входной цепи имеет место и у каскада, собранного по схеме фиг. 6,*д*. Оно проявляется тем больше, чем больше отношение R_2 к R_1.



Фиг. 7. Зависимость выходного сопротивления катодного повторителя от внутреннего сопротивления источника сигнала для схемы подачи напряжения смещения, соответствующей фиг. 6,*д*.

Особенностью катодных повторителей, собранных по схемам фиг. 6,*д* и *и*, является то, что их входное и выходное сопротивления зависят от внутреннего сопротивления источника сигнала $R_{ист}$. Увеличение последнего вызывает повышение выходного и уменьшение входного сопротивления каскада. Объясняется это тем, что с изменением внутреннего сопротивления источника сигнала меняется глубина отрицательной обратной связи.

Для схемы фиг. 6,*д* выходное сопротивление определяется следующей формулой:

$$R_{вых} = \frac{1}{S\left(1 - \frac{R_{ист}}{R_{ист} + R_c} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) + \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_1 + R_2}}.$$

В качестве примера на фиг. 7 показана зависимость выходного сопротивления $R_{вых}$ от сопротивления источника для следующих данных: лампа 6С2С, $S = 2{,}5$ *ма/в*, $R_1 = 2$ *ком*, $R_2 = 10$ *ком*, $R_c = 0{,}5$ *мгом* и $R_i = 10$ *ком*. При $R_{ист} = 0$ выходное сопротивление оказывается минимальным.

Если пользоваться номограммой, приведенной на стр. 52, то ошибка в определении выходного сопротивления будет невелика при $R_{ист}$ порядка нескольких де-

сятков — сотен килоом. При большем R_{ucm} ошибка будет значительна. Формула для подсчета выходного сопротивления каскада, выполненного по схеме фиг. 6,*и* несколько проще предыдущей:

$$R_{вых} = \frac{1}{S\left(1 - \frac{R_{ucm}}{R_{ucm} + R_c}\right) + \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_н}}.$$

Как уже говорилось, при R_{ucm}, близком к нулю, для расчета выходного сопротивления каскада независимо от способа подачи напряжения смещения можно пользоваться приведенной номограммой.

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КАТОДНОГО ПОВТОРИТЕЛЯ

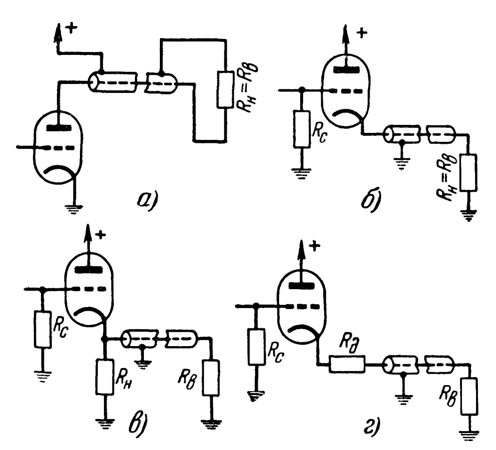
Работа на кабель. Широкое применение катодный повторитель находит в тех случаях, когда усилитель или иной источник напряжения должен работать на кабель, соединяющий этот источник с нагрузкой. Такая необходимость часто возникает в телевизионной и импульсной технике, широковещании и т. д., когда отдельные узлы устройства приходится отдалять друг от друга на сравнительно большие расстояния. При этом кабель чаще всего используют как „длинную линию".

Длинной линией называется линия электрической передачи, длина которой сравнима с длиной распространяющихся вдоль нее электромагнитных волн. Такая линия обладает замечательным свойством: если сопротивление нагрузки на конце линии равно ее волновому сопротивлению, т. е. согласовано с ней, то входное сопротивление линии также равно ее волновому сопротивлению и линия представляет собой систему, обладающую идеальной частотной и фазовой характеристиками. Такая система передает импульс любой формы или какой-нибудь иной сигнал без всяких искажений.

Ввиду малости активного сопротивления линии по сравнению с ее индуктивным и емкостным сопротивлениями с ним можно не считаться. В этом случае волновое сопротивление линии $R_в$ равно квадратному корню из отношения индуктивности единицы ее длины к емкости единицы ее длины. Для большинства типов кабеля волновое сопротивление составляет несколько десятков ом. Например: кабель типа РК-6 имеет волновое сопротивление

50 *ом*, кабели типа РК-1, РК-3, РК-4 — 75 *ом*, кабель РК-2—100 *ом*, РК-50—150 *ом* и т. д.

Коэффициент усиления каскада с общим катодом при $R_н$, много меньшем R_i лампы, равен произведению $SR_н$. Поэтому при малых значениях сопротивления нагрузки коэффициент усиления такого усилителя оказывается меньше единицы. Например: при волновом сопротивлении кабеля



Фиг. 8. Различные способы подключения кабеля.

а—в усилителе с общим катодом, *б* — для случая, когда волновое сопротивление кабеля равно R_i'; *в* — когда волновое сопротивление кабеля больше R_i', *г*—когда волновое сопротивление кабеля меньше R_i'.

в 75 *ом* и крутизне лампы 5 *ма/в* усиление каскада будет равно $K = 5 \cdot 10^{-3} \cdot 75 = 0{,}375$. Коэффициент усиления катодного повторителя при тех же данных равен 0,272.

При подключении кабеля к усилителю с общим катодом он находится под сравнительно высоким постоянным потенциалом относительно земли (фиг. 8,*а*), что не всегда допустимо. В этих случаях его приходится подключать к аноду лампы не непосредственно, а через разделительный конденсатор. Чтобы частотные искажения отсутствовали, сопротивление переходного конденсатора на низших частотах рабочего диапазона должно быть достаточно малым. Для этого приходится брать конденсатор емкостью порядка нескольких десятков и больше

микрофарад, причем его рабочее напряжение должно быть не ниже анодного напряжения каскада. Это удорожает и усложняет конструкцию устройства и является серьезным недостатком усилителя с общим катодом.

Катодный повторитель позволяет обойтись без разделительных конденсаторов, так как в этом случае оболочка кабеля заземляется, а постоянное напряжение, подаваемое в линию и равное падению напряжения на сопротивлении нагрузки, невелико.

Для наилучшей передачи сигнала по кабелю необходимо, чтобы выходное сопротивление источника сигнала, работающего на кабель, равнялось его волновому сопротивлению, т. е. чтобы кабель был согласован как со стороны входа, так и выхода. Если волновое сопротивление $R_в$ кабеля равно внутреннему сопротивлению лампы катодного повторителя R_i', то кабель присоединяется к катодному повторителю так, как показано на фиг. 8,*б*. Подобрать необходимую величину $R_i' = \frac{1}{S}$ можно, изменяя положения рабочей точки на характеристике лампы. В том случае, если $R_в$ мало, вследствие чего требуемое R_i' не может быть получено, выходное сопротивление катодного повторителя можно уменьшить, подключив параллельно входу кабеля дополнительное сопротивление нагрузки (фиг. 8,*в*). Величина этого сопротивления определяется из соотношения $R_в = R_{вых} = \frac{R_i' \cdot R_н}{R_i' + R_н}$, откуда

$$R_н = \frac{R_i' \cdot R_в}{R_i' - R_в} = \frac{R_в}{1 - SR_в}.$$

Если волновое сопротивление кабеля $R_в$ превышает R_i', то для осуществления согласования необходимо включить дополнительное сопротивление $R_д$, равное по величине разности между волновым сопротивлением кабеля и эквивалентным внутренним сопротивлением лампы (фиг. 8,*г*),

$$R_д = R_в - R_i' = R_в - \frac{1}{S}.$$

На фиг. 8 с целью упрощения чертежа везде показан один и тот же способ подачи напряжения смещения. Естественно, что на практике могут быть использованы

и другие способы, приведенные на фиг. 6. Поскольку для согласования с линией необходимо точно знать выходное сопротивление каскада, напоминаем, что для схем фиг. 6,*д* и *и* несправедлива номограмма, приведенная в конце брошюры. В этих случаях сопротивление катодного повторителя следует рассчитывать по ранее приведенным точным формулам.

Следует отметить, что часто достаточно хорошее качество передачи получается при согласовании линии только с одного ее конца. В этом случае то, что внутреннее сопротивление R_i лампы усилителя с общим катодом велико, может не быть препятствием к его использованию для работы на линию.

В радиовещании катодный повторитель может служить в качестве согласующего элемента между микрофонным усилителем и кабелем. В этом случае катодный повторитель заменяет специальный переходной трансформатор, который дорог и, кроме того, довольно восприимчив к помехам.

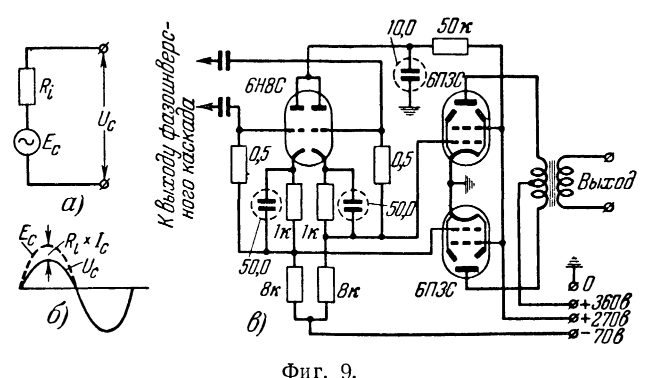
Расчет параметров катодного повторителя, работающего на кабель, не вызывает затруднений. Пусть, например, требуется передать по кабелю типа РК-2, имеющему волновое сопротивление $R_в = 100$ *ом*, П-образный импульс напряжения с амплитудой 2 *в*. Требуемый импульс тока при нагрузке $R_в = 100$ *ом* составит $I_a = \frac{U_{вых}}{R_в} = \frac{2}{100} = 20$ *ма*. При выборе типа лампы исходим из тока, который она может отдать, и крутизны ее характеристики. Чем больше крутизна, тем больше K, т. е. тем меньшее напряжение нужно будет подавать на вход каскада. Возьмем лампу 6П9. Считаем, что средняя крутизна в используемом участке характеристики равна 9 *ма/в*. Тогда $R_i = \frac{1}{S} = \frac{1}{9 \cdot 10^{-3}} = 111$ *ом*. Эта величина отличается от волнового сопротивления кабеля на 11%. Для большинства практических случаев рассогласование такого порядка с входного конца кабеля вполне допустимо и можно выбрать схему включения кабеля, приведенную на фиг. 8,*б*. Если же необходимо добиться полного согласования кабеля, то следует применить схему фиг. 8,*в*. Тогда сопротивление на входе кабеля $R_н = \frac{R_в}{1 - SR_в} = \frac{100}{1 - 9 \cdot 10^{-3} \cdot 100} = 1\,000$ *ом*.

В этом случае полное сопротивление нагрузки лампы $R = \frac{R_в \cdot R_н}{R_в + R_н} = \frac{100 \cdot 1\,000}{100 + 1\,000} = 91$ *ом*, а требуемый импульс тока $I_a = \frac{U_{вых}}{R} = \frac{2}{91} = 22$ *ма*. Коэффициент усиления K в этом случае получается равным 0,46. Его можно определить при помощи номограммы для пентодов, приведенной на стр. 51 (для $S = 9$ *ма/в* и $R_н = 91$ *ом*). Необходимая амплитуда импульса на входе каскада

$$U_{вх} = \frac{U_{вых}}{K} = \frac{2}{0,46} = 4,36 \text{ в}.$$

Управление оконечной лампой, работающей с сеточными токами. Оконечные каскады мощных усилителей низкой частоты, импульсных и других устройств в ряде случаев работают в режиме, при котором в сеточной цепи протекают значительные токи. Наличие сеточных токов приводит к искажениям формы усиливаемого сигнала. До тех пор пока уровень сигнала таков, что сеточные токи не возникают, напряжение на входе следующего каскада равно э. д. с. источника сигнала. Появление сеточного тока вызывает падение напряжения на внутреннем сопротивлении источника и напряжение, подаваемое на вход оконечного каскада, уменьшается. В результате возникают нелинейные искажения.

Если, например, э. д. с. генератора, внутреннее сопротивление которого равно R_i (фиг. 9,*а*), имеет синусоидаль-



Фиг. 9.

а — эквивалентная схема источника сигнала; *б* — искажения сигнала U_C по сравнению с э. д. с. E_C из-за наличия сеточных токов; *в* — практическая схема управления при помощи катодного повторителя оконечной лампой, работающей с сеточными токами.

ный характер (пунктирная линия на фиг. 9,*б*), то напряжение, подводимое к сетке лампы, получится отличным от синусоиды (сплошная линия на фиг. 9,*б*). Разность между напряжением на сетке лампы и э. д. с. источника сигнала представляет в каждый данный момент времени падение напряжения на внутреннем сопротивлении этого источника и равна произведению R_i на сеточный ток I_c. При данном режиме оконечной лампы искажения будут тем меньше, чем меньше внутреннее сопротивление источника сигнала. Поэтому в качестве предшествующего каскада, работающего с сеточными токами, целесообразно использовать катодный повторитель, обладающий малым внутренним сопротивлением. Здесь катодный повторитель, позволяя получить хорошую частотную характеристику в широком диапазоне частот, заменяет дорогостоящий трансформатор. Недостатком схемы является то, что вследствие низкого коэффициента усиления катодного повторителя приходится повышать амплитуду напряжения, подводимого к предоконечному каскаду.

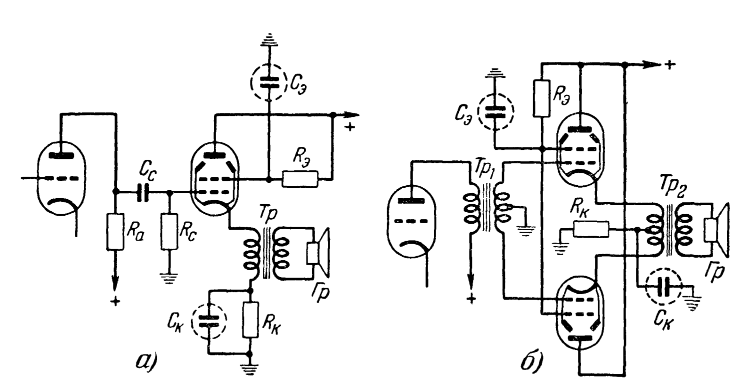
На фиг. 9,*в* в качестве примера изображена схема усилителя, в котором два катодных повторителя, собранных на лампе 6Н8С, используются для возбуждения пятидесятиваттного оконечного двухтактного блока, работающего на лампах 6П3С в режиме класса Б с сеточными токами.

Оконечный каскад усилителя низкой частоты. Во всех приведенных выше случаях работы катодного повторителя на нагрузку с малым сопротивлением его можно рассматривать как усилитель тока либо усилитель мощности. Если у усилителя с общим катодом, вследствие того, что он обладает большим внутренним сопротивлением, основная часть мощности теряется на этом сопротивлении, то у катодного повторителя благодаря малой величине R'_i бо̀льшая часть мощности выделяется на нагрузке. Поэтому катодные повторители могут с успехом применяться в качестве оконечных каскадов. При этом они имеют ряд значительных преимуществ.

Известно, что если параллельно колебательному контуру включено сопротивление, то чем меньше это сопротивление, тем больше затухание контура и меньше проявляются его колебательные свойства. Подвижную систему громкоговорителя, на который нагружен оконечный каскад, можно уподобить некоторому электрическому

колебательному контуру. Чем меньше выходное сопротивление оконечного каскада, тем больше он шунтирует этот контур и вносит в него большее затухание. Так как с увеличением затухания резонансные свойства системы выражаются слабее, то громкоговоритель меньше подчеркивает какие-либо определенные частоты. Это повышает линейность его амплитудно-частотной характеристики.

После прекращения действия сигнала механическая система громкоговорителя вследствие инерции продолжает еще некоторое время колебаться. При этом возникают



Фиг. 10. Однотактный (*а*) и двухтактный (*б*) оконечные каскады усилителя н. ч., собранные по схеме катодного повторителя.

звуки, отсутствовавшие в сигнале и снижающие качество воспроизведения передачи. Чем больше затухание, тем, естественно, меньше будет сказываться это явление.

Оконечный каскад, выполненный в виде катодного повторителя, позволяет получить наиболее низкое выходное сопротивление в широком диапазоне частот и соответственно обеспечить высокое качество звучания.

К преимуществам оконечных каскадов, представляющих собой катодный повторитель, следует отнести также и то, что в них могут быть применены значительно менее громоздкие и более дешевые выходные трансформаторы, чем в каскадах, собранных по другим схемам. Объясняется это наличием глубокой отрицательной обратной связи. Однотактный и двухтактный каскады, схемы которых приведены на фиг. 10,*а* и *б*, позволяют получить линейную характеристику усиления в области нижних звуковых частот даже при невысоком качестве их выходных транс-

форматоров. Для того чтобы максимально использовать преимущества катодного повторителя, в нем следует применить выходной трансформатор, имеющий возможно меньшую индуктивность рассеяния, ухудшающую воспроизведение в области верхних звуковых частот.

При использовании приведенных схем особенно остро дает себя чувствовать основной недостаток катодного повторителя — его малый коэффициент усиления K и связанная с этим необходимость большого напряжения возбуждения. Для того, чтобы обеспечить необходимую амплитуду входного напряжения, приходится заметно повышать анодное напряжение предыдущего каскада. В оконечном каскаде предпочтительнее применять пентоды, так как они требуют меньшее, чем триоды, возбуждающее напряжение.

Применение катодного повторителя в качестве входного каскада. Благодаря высокому входному сопротивлению катодный повторитель часто используют в качестве входного каскада. В тех случаях, когда нужно снять напряжение с источника с большим внутренним сопротивлением или же исключить влияние измерительного прибора на измеряемую цепь, катодный повторитель ставится перед усилителем или соответствующим устройством.

Входное сопротивление катодного повторителя по сравнению с усилителем с общим катодом наиболее заметно возрастает при использовании пентодов. Поскольку анод лампы катодного повторителя для переменной составляющей находится под нулевым потенциалом, то емкость сетка—анод C_{ca} шунтирует источник сигнала. Таким образом, емкостная составляющая входного сопротивления слагается из суммы емкостей сетка—анод и сетка—катод лампы. Емкость сетка—анод у пентодов мала (обычно она составляет сотые или тысячные доли микромикрофарады) и ее шунтирующим влиянием можно пренебречь. Что касается емкости сетка—катод $C_{ск}$, определяющей в случае применения пентода входное сопротивление каскада, то ее динамическое значение уменьшается, как уже говорилось, в $\frac{1}{1-K}$ раз.

У триодов емкость C_{ca} значительно больше, чем у пентодов. Для большинства типов ламп она составляет несколько пикофарад, и с ней нельзя не считаться. В силу этого выигрыш в уменьшении входной емкости катодного

повторителя на триоде получается менее заметным, так как уменьшается только одна ее составляющая. Таким образом, в тех случаях, когда катодный повторитель используется в качестве входного каскада, следует отдать предпочтение пентоду. С другой стороны, триод по сравнению с пентодом обладает значительно меньшим уровнем собственных шумов. Поэтому при слабом сигнале наилучшей лампой является триод с большим μ (например, триод типа 6Ф5).

Иногда бывает необходимым, чтобы каскад имел большое входное сопротивление на низких частотах, при которых емкостная составляющая входной проводимости пренебрежимо мала и теряет свое значение. В этом случае основную роль играет выбор схемы подачи отрицательного смещения на управляющую сетку лампы (стр. 17) и коэффициент усиления каскада. Выбрав соответствующую схему, можно заметно увеличить динамическое значение сопротивления утечки R_c или же вовсе исключить его (фиг. 6,*ж*), а подобрав соответствующую лампу и ее режим, — значительно снизить сеточный ток и, таким образом, получить большое входное сопротивление.

На практике иногда имеет место снижение входного сопротивления катодного повторителя в высокочастотной части спектра. Это явление связано со снижением его коэффициента усиления вследствие шунтирующего действия емкости нагрузки $C_н$. Поэтому в тех случаях, когда это может иметь значение, следует проверить ширину полосы пропускания каскада, чтобы убедиться, достаточно ли горизонтальна его частотная характеристика в интересующей области частот.

В качестве примера рассмотрим случай применения катодного повторителя как входного каскада усилителя, работающего от фотоэлемента.

Напряжение на сопротивлении нагрузки фотоэлемента определяется величиной фототока. Чувствительность фотоэлементов очень невелика и составляет от нескольких десятков микроампер на люмен у вакуумных до нескольких сот микроампер на люмен у газонаполненных. Фотоэлемент обычно работает в режиме насыщения, т. е. практически все вылетающие под влиянием светового потока электроны достигают его анода. Поэтому изменение напряжения на фотоэлементе в рабочей области при постоянной освещенности почти не влияет на величину

фототока. Это значит, что внутреннее сопротивление фотоэлемента очень велико, а сам фотоэлемент можно рассматривать как генератор тока, т. е. считать, что сила тока в его цепи не зависит от величины сопротивления нагрузки. Для получения наибольшего напряжения сигнала сопротивление нагрузки надо брать как можно большим. Обычно его выбирают от нескольких единиц до нескольких десятков мегом. Естественно, что при таком сопротивлении нагрузки сильно сказывается шунтирующее действие входной емкости каскада. При воздействии на фотоэлемент переменного светового потока эта емкость сильно ограничивает полосу пропускания в области верхних частот. Поэтому ее уменьшение имеет большое значение с точки зрения расширения линейного участка амплитудно-частотной характеристики. Так, при коэффициенте усиления катодного повторителя, равном 0,95, входная емкость лампы уменьшится в 20 раз. Это заметно передвинет верхнюю граничную частоту полосы пропускания по сравнению со случаем подключения фотоэлемента к каскаду с общим катодом.

Чем более рационален монтаж, т. е. чем больший удельный вес во входной емкости каскада составляет входная емкость лампы, тем бо̀льшим получается выигрыш при применении катодного повторителя. Поэтому фотоэлемент стараются расположить возможно ближе к сетке лампы катодного повторителя. Иногда катодный повторитель вместе с фотоэлементом образует так называемую „фотоэлектрическую головку", которая при помощи кабеля соединяется с основным усилителем, находящимся в другом месте. Однако при этом, вследствие того что кабель, нагружающий катодный повторитель, имеет малое волновое сопротивление, снижается его коэффициент усиления и, следовательно, выигрыш в уменьшении входной емкости.

Обычно основную опасность представляет емкость сеточной цепи по отношению к шасси („земле"). В отдельных случаях с целью ослабления ее влияния применяют экранирование элементов этой цепи, а экраны присоединяют к катоду лампы катодного повторителя. Тогда емкость монтажа цепи сетка—земля резко уменьшается, а динамическое значение емкости сетка—катод получается незначительным благодаря свойствам катодного повторителя. Вследствие этого общий выигрыш в уменьшении входной емкости оказывается довольно заметным.

Применение катодного повторителя в качестве входного каскада целесообразно также при работе с иконоскопом, так как здесь, как и в случае использования фотоэлемента, желательно, чтобы сопротивление нагрузки, лимитируемое входной емкостью каскада, было возможно большим.

Весьма целесообразно применение катодного повторителя в качестве каскада, предшествующего усилителю низкой частоты, работающему от пьезоэлектрического звукоснимателя или микрофона. Малая входная емкость катодного повторителя, дающая возможность нагружать источник сигнала большим сопротивлением, и в этом случае является важным преимуществом.

Так как в рассматриваемом случае мы имеем дело с источником сигнала, обладающим большим внутренним сопротивлением, которое к тому же растет с уменьшением частоты, то здесь напряжение смещения не следует подавать так, как показано на схемах фиг. 6,*д* и *и*. Как уже упоминалось, рост внутреннего сопротивления источника сигнала сопровождается здесь уменьшением входного и увеличением выходного сопротивления, что нежелательно.

Применение катодного повторителя для уменьшения влияния емкости кабеля. Ранее указывалось, что кабель обычно рассматривают как длинную линию. Это верно в тех случаях, когда длина кабеля достаточно велика по сравнению с длиной волны питающего генератора. Когда длина кабеля в 12—15 раз меньше длины волны, соответствующей наивысшей частоте полосы пропускания тракта, кабель с достаточной для практики точностью можно рассматривать как емкость

$$C_{вх} = \frac{l}{R_в \cdot C},$$

где $C_{вх}$ — емкость кабеля, *пф*;

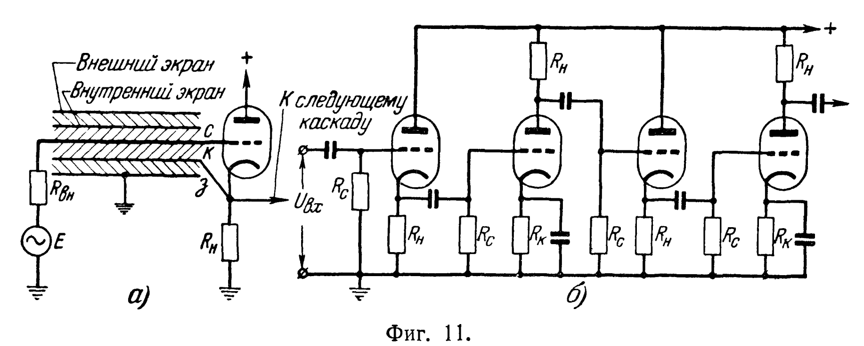
l — длина кабеля, *см*;

$R_в$ — его волновое сопротивление, *ом*;

C — скорость света, равная $3 \cdot 10^{10}$ *см/сек*.

Если внутреннее сопротивление генератора велико, емкость кабеля $C_{вх}$ может оказать сильное шунтирующее влияние. Установка непосредственно у источника сигнала катодного повторителя или какого-либо другого каскада для исключения влияния этой емкости не всегда возможна или удобна. В этом случае, как указывалось выше, для

уменьшения ее вредного действия можно использовать особенности входной цепи катодного повторителя. Центральную жилу кабеля присоединяют к управляющей сетке лампы катодного повторителя, а его оболочку — к катоду. Сам кабель в свою очередь заключают в заземляемую металлическую оболочку („чулок"), которую надевают поверх его изоляции (фиг. 11,*а*). В результате емкость $C_{ск}$, образованная центральной жилой и внутренним экраном, оказывается включенной между сеткой и катодом лампы, в то время как емкость между внутрен-



Фиг. 11.

а — схема использования катодного повторителя для уменьшения действия емкости кабеля; *б* — для уменьшения действия входной емкости каскада в широкополосном усилителе.

ним и внешним экраном играет роль выходной емкости катодного повторителя. Первая уменьшается в $\frac{1}{1-K}$ раз, благодаря чему шунтирующее действие кабеля резко ослабевает. Что касается емкости $C_{кз}$, то влияние ее сказывается незначительно в широкой области частот. Тогда, когда с влиянием выходной емкости приходится считаться, принимаются конструктивные меры к уменьшению емкости между первым и вторым экраном.

Описываемый метод целесообразно применять также и в тех случаях, когда по условиям работы измерительный прибор может быть присоединен к исследуемой цепи только при помощи кабеля, причем емкость кабеля может оказаться значительной и ее желательно уменьшить.

Чем больше коэффициент усиления катодного повторителя (больше крутизна характеристики лампы и сопротивление нагрузки), тем значительнее выигрыш в уменьшении емкости. Этот выигрыш несколько ослабляется тем,

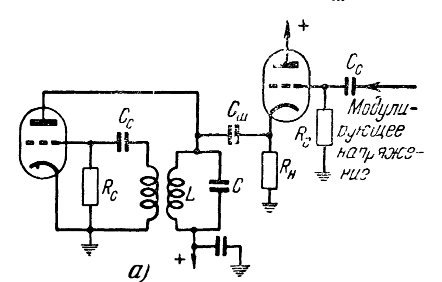
что к емкости кабеля добавляется емкость монтажа и самой лампы катодного повторителя. Если эти емкости отнести к единице длины кабеля, то станет ясно, что выигрыш при применении описанного метода получается тем бо̀льшим, чем длиннее кабель.

Междукаскадная связь в широкополосных усилителях. В многокаскадных широкополосных усилителях входная емкость следующего каскада, шунтирующая анодную нагрузку лампы, является основным фактором, ограничивающим его полосу пропускания в области высших частот. Так как входная емкость катодного повторителя значительно меньше емкости обычного каскада, то с его помощью можно расширить полосу пропускания таких усилителей. В этих случаях он применяется в качестве промежуточного каскада, через который осуществляется связь между двумя соседними каскадами усилителя с общим катодом (фиг. 11,*б*). При такой схеме анодная нагрузка лампы шунтируется значительно меньшей емкостью и завал характеристики каскада в области верхних частот уменьшается. Сам же катодный повторитель, обладая очень хорошими частотной и фазовыми характеристиками, не вносит искажений. В ряде случаев использование катодного повторителя дает возможность увеличивать нагрузочное сопротивление предыдущего каскада, что позволяет даже получать выигрыш в усилении.

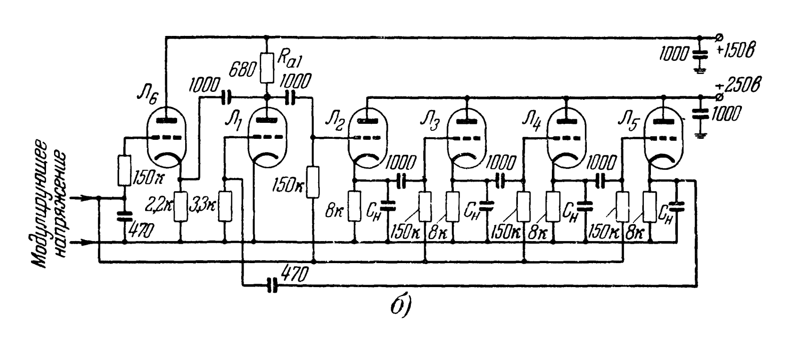
Частотная модуляция. Существует ряд схем частотной модуляции с катодными повторителями. Эти схемы отличаются сравнительной простотой и позволяют получить хорошую линейную зависимость частоты от управляющего напряжения при большом проценте изменения частоты.

На фиг. 12,*а* приведена принципиальная схема самовозбуждающегося генератора с индуктивной обратной связью. Параллельно его колебательному контуру LC подключен конденсатор $C_{ш}$, соединенный последовательно с сопротивлением $R_{н}$ нагрузки катодного повторителя. Шунтирующее действие конденсатора и обусловленное им изменение частоты генератора зависят от сопротивления $R_{н}$ и параллельного ему внутреннего сопротивления лампы R_{i}', т. е. от выходного сопротивления каскада $R_{вых}$. Меняя напряжение смещения на управляющей сетке лампы катодного повторителя, можно в широких пределах изменять выходное сопротивление $R_{вых}$. При мини-

мальной величине этого сопротивления конденсатор $C_ш$ практически подключен к контуру и емкость последнего равна сумме емкостей конденсаторов C и $C_ш$. Частота генерируемых колебаний в это время минимальна. Наоборот, при напряжении на сетке лампы, близком к тому, при котором она запирается, и достаточно большой величине $R_н$ конденсатор $C_ш$ практически отключен от контура и частота генератора максимальна.



Таким образом, меняя напряжение на управляющей сетке лампы катодного повторителя, можно в широких пределах изменять частоту колебаний, создаваемых генератором, и таким путем осуществлять частотную модуляцию. Недостатком схемы является то, что затухание, вносимое в контур, сильно меняется по диапазону.



Фиг 12. Схема частотной модуляции, использующие катодный повторитель.

а — частотная модуляция *LC* генератора, *б* — *RC* генератора.

Для проверки полосы пропускания и визуального контроля на экране осциллографа резонансных кривых УКВ приемников желательно иметь генератор синусоидальных колебаний, частота генерируемых колебаний которого меняется в широких пределах. На фиг. 12,*б* приведена схема такого *RC* генератора. В нем используется пять катодных повторителей. Четыре из них $Л_2$, $Л_3$, $Л_4$ и $Л_5$ совершенно одинаковы и образуют фазовращатель, пятый

($Л_6$) служит для изменения динамического сопротивления анодной нагрузки генераторной лампы $Л_1$.

Колебания в генераторе, собранном по схеме фиг. 12,*б*, будут иметь место только при условии, когда напряжение, подаваемое из анодной цепи лампы $Л_1$ в цепь ее сетки, совпадает по фазе с сеточным напряжением и имеет амплитуду не ниже определенной. Для того чтобы форма колебаний была синусоидальна, это условие должно выполняться только для одной определенной частоты.

Если считать нагрузку лампы $Л_1$ чисто активной, то напряжение на ее аноде по отношению к напряжению на сетке сдвинуто по фазе на 180°. Каждый из четырех катодных повторителей фазовращателя благодаря большому шунтирующему действию конденсаторов $C_н$ сдвигает по фазе выходное напряжение относительно входного на 45°. Таким образом, все четыре катодных повторителя сдвигают по фазе выходное напряжение еще на 180°, в результате чего полный поворот фазы составляет 360°. Если при этом усиление лампы $Л_1$ несколько превышает ослабление, даваемое катодными повторителями, то она будет генерировать колебания как раз той частоты, для которой полный фазовый сдвиг составляет эти 360°.

Изменяя соотношение между R и C, можно менять частоту, для которой выполняется этот фазовый сдвиг, а следовательно, и частоту генерируемых колебаний. Это осуществляется посредством модулирующего напряжения, подаваемого на сетки ламп катодных повторителей. При возрастании этого напряжения растет крутизна ламп, падает их внутреннее сопротивление и, следовательно, поворот фазы на 360° будет происходить на более высокой частоте, в результате чего возрастет частота генерируемых колебаний. При уменьшении модулирующего напряжения эта частота снижается.

Так как понижение частоты связано с уменьшением крутизны ламп фазовращателя, то оно вызывает увеличение даваемого ими ослабления. Поэтому при некоторой частоте ослабление напряжения, подаваемого из анодной цепи в сеточную, окажется столь велико, что условия самовозбуждения нарушатся и колебания сорвутся. Этим определяется нижняя граница диапазона генератора.

В начале было принято, что нагрузка лампы $Л_1$ чисто активна. Практически с увеличением частоты генерируемых колебаний все сильнее сказывается действие емко-

сти, шунтирующей сопротивление R_{a1}. Вследствие этого фазовый сдвиг, создаваемый лампой $Л_1$, начинает отличаться от 180°, что нарушает линейность зависимости генерируемой частоты от модулирующего напряжения или, иначе говоря, приводит к нелинейным искажениям. При допустимом требованиями к генератору коэффициенте нелинейных искажений это явление определяет верхний предел изменения частоты.

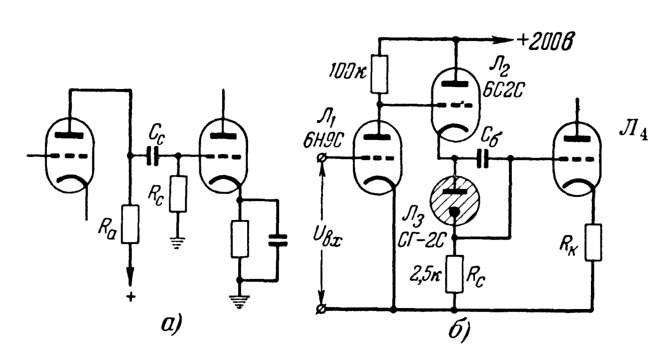
Вследствие емкостной нагрузки катодных повторителей с ростом частоты возрастает отрицательная составляющая их входного сопротивления, что уменьшает даваемое ими ослабление (растет коэффициент усиления K). Это позволяет уменьшить на высших частотах сопротивление R_{a1} и тем самым ослабить действие шунтирующей его емкости и увеличить верхний предел изменения частоты. Однако в области нижних частот усиление, даваемое лампой $Л_1$, должно быть максимальным. Вследствие этого уменьшение сопротивления R_{a1} ограничило бы изменение частоты в сторону ее понижения. Выход состоит в том, чтобы динамическое сопротивление нагрузки лампы $Л_1$ сделать переменным. Это достигается тем, что параллельно сопротивлению R_{a1} подключается шунтирующий его катодный повторитель $Л_6$. Модулирующее напряжение подается одновременно на все пять катодных повторителей. Таким образом, удается дополнительно увеличить пределы изменения частоты.

При использовании ламп типа 6Ж3 генератор фиг. 12,*б* позволяет изменять частоту примерно в пределах от 32 до 90 *мггц*. Введение лампы $Л_6$ позволяет снизить динамическое значение анодной нагрузки до 60 *ом* и тем самым повысить максимальную генерируемую частоту до 150 *мггц*.

Междукаскадная связь в усилителях постоянного тока. В различных отраслях народного хозяйства для усиления медленно изменяющихся напряжений применяются так называемые „усилители постоянного тока". Их главной отличительной особенностью по сравнению с обычными усилителями низкой частоты является способ связи между каскадами.

Как известно, в обычном усилителе на сопротивлениях (фиг. 13,*а*) в рабочем диапазоне частот сопротивление переходного конденсатора C_c должно быть мало по

сравнению с сопротивлением утечки R_c, включенным в цепь управляющей сетки следующей лампы. С уменьшением частоты выполнение этого условия становится все более затруднительным, а при частотах в десятые и сотые доли герца практически невозможным, так как для пропускания таких низких частот пришлось бы чрезмерно увеличивать емкость переходного конденсатора. Трансформатор здесь также непригоден, так как для очень низких частот его сопротивление близко к нулю.



Фиг. 13. Схема междукаскадной связи.

а — в обычном усилителе н. ч.; *б* — в усилителе постоянного тока, использующего для междукаскадной связи катодный повторитель.

Для того чтобы частотная характеристика усилителя постоянного тока шла горизонтально от „нулевой" частоты, элементы связи анодной цепи предыдущей лампы с цепью сетки последующей должны передавать самые медленные изменения напряжения и в то же время обеспечивать необходимое положение рабочей точки второй лампы. Одним из способов разрешения этой задачи является применение для междукаскадной связи катодного повторителя с нагрузкой, состоящей из газоразрядного стабилизатора напряжения и активного сопротивления (фиг. 13,*б*).

На управляющую сетку лампы $Л_2$ катодного повторителя подается напряжение непосредственно с анода лампы первого каскада усилителя. Нагрузкой катодного повторителя является газоразрядный стабилизатор напряжения $Л_3$ и сопротивление R_c. Так как при колебаниях в некоторых пределах тока, протекающего через газоразрядный стабилизатор, падение напряжения на нем

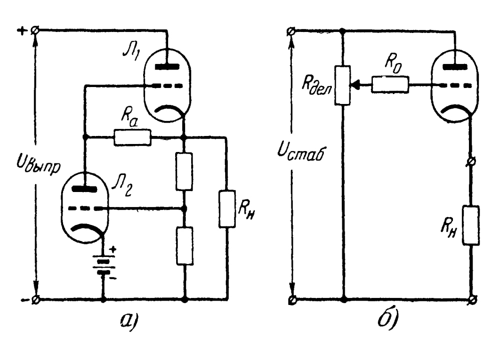
остается постоянным, то при изменении анодного тока лампы $Л_2$ напряжение в основном изменяется только на сопротивлении R_c. В то же время на стабилизаторе $Л_3$ падает бо̀льшая часть постоянного напряжения, благодаря чему напряжение смещения на сетке лампы $Л_2$ получается отрицательным. Сопротивление R_c должно быть значительно меньше сопротивления газоразрядной лампы постоянному току, но больше ее сопротивления переменному току.

Для создания нормального напряжения смещения на управляющей сетке лампы $Л_4$ здесь не нужен, как в других усилителях постоянного тока, отдельный источник смещения. Компенсация постоянного положительного напряжения, поступающего на сетку этой лампы с сопротивления R_c, может быть получена за счет падения напряжения на сопротивлении $R_к$, включенном в цепь ее катода. Так как падение постоянного напряжения на сопротивлении R_c невелико, то сопротивление $R_к$ может быть небольшим. Поэтому отрицательная обратная связь в цепи лампы $Л_4$ получается незначительной и вследствие этого невелико снижение усиления каскада. Некоторое снижение общего усиления, связанное с тем, что коэффициент усиления като̀дного повторителя меньше единицы, а также увеличение общего числа ламп вполне искупаются, так как здесь требуется только один источник анодного питания и имеется общий „нулевой" провод.

Следует отметить, что так как перенос электрических зарядов в газоразрядном стабилизаторе осуществляется ионизированными молекулами газа, скорость которых сравнительно мала, то изменение тока через стабилизатор несколько запаздывает по сравнению с напряжением на нем. Вследствие этого стабилизатор как бы эквивалентен индуктивности и его сопротивление растет с частотой. Это обстоятельство ограничивает верхнюю граничную частоту усилителей этого типа. Увеличение сопротивления газоразрядной лампы с частотой можно в некоторых пределах скомпенсировать, шунтировав ее конденсатором $C_б$.

Применение катодных повторителей в выпрямителях. В лабораторной и радиолюбительской практике часто применяют выпрямители с электронной стабилизацией напряжения. Наиболее широко распространен электрон-

ный стабилизатор напряжения с катодной нагрузкой. Постоянство выпрямленного напряжения здесь обеспечивается как при изменении напряжения на входных зажимах выпрямителя, так и при изменении нагрузки. Схемы таких стабилизаторов были неоднократно описаны [1], хорошо знакомы многим радиолюбителям, и поэтому они в данной брошюре не приводятся. Следует упомянуть только о том, что электронный стабилизатор напряжения с катодной нагрузкой (фиг. 14,*а*) представляет собой, по сути дела, катодный повторитель $Л_1$ с усилителем в



Фиг. 14.

а — принципиальная схема электронного стабилизатора напряжения с катодной нагрузкой; *б* — схема регулирования напряжения в ответвлении.

цепи обратной связи $Л_2$. Отсюда непосредственно вытекают упомянутые выше свойства стабилизатора, а также его низкое выходное сопротивление.

Обычно в такого рода стабилизаторах регулировка выпрямленного напряжения осуществляется изменением напряжения смещения на управляющей сетке усилительной лампы. При этом уменьшение напряжения ниже некоторого предела встречает заметные затруднения. В ряде случаев от одного и того же стабилизатора желательно иметь несколько отдельных, независимо регулируемых напряжений. Для решения этих задач можно использовать катодный повторитель. К выходным зажимам стабилизатора подключают высокоомный делитель напряжения $R_{дел}$ (фиг. 14,*б*), часть напряжения с которого подают на вход одного или нескольких катодных повто-

---

[1] См., например, К. Б. Мазель, Стабилизаторы напряжения и тока, Госэнергоиздат, 1955.

рителей. Сопротивление R_0 служит для ограничения сеточного тока в случае его возникновения. Преимуществом такой схемы является то, что внутреннее сопротивление ответвления $R'_i = \frac{1}{S}$ получается достаточно низким, даже ниже, чем в случае применения низкоомного делителя, сильно нагружающего выпрямитель (чаще всего R'_i оказывается меньшим 1% сопротивления нагрузки). Кроме того, здесь легко осуществляется плавная регулировка напряжения.

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ КАТОДНОГО ПОВТОРИТЕЛЯ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ ИМПУЛЬСОВ

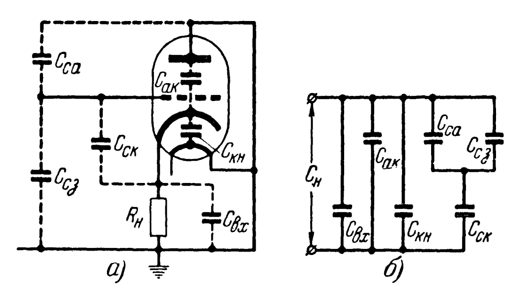
Часто катодный повторитель работает на короткий отрезок кабеля, который нельзя рассматривать как длинную линию и следует считать емкостью. В ряде других случаев его нагрузка также носит комплексный характер и представляет собой параллельно соединенные активное сопротивление $R_н$ и емкость $C_н$ (фиг. 2). Емкость $C_н$ обычно представляет собой сумму ряда паразитных емкостей. Ее величина, как правило, не очень велика и определяет степень завала амплитудно-частотной и фазово-частотной характеристики каскада. Обычно благодаря малому внутреннему сопротивлению катодного повторителя с ее влиянием можно не считаться. Однако при передаче импульсов эта емкость может вызвать искажение фронтов импульса, снижение входного сопротивления катодного повторителя и другие нежелательные явления.

Поскольку величина емкости $C_н$ играет при импульсной работе существенную роль, начнем с ее определения. На фиг. 15,*а* приведена схема катодного повторителя с указанием всех емкостей, обуславливающих суммарную величину $C_н$. Анод лампы катодного повторителя для переменной составляющей практически соединен накоротко с общим нулевым проводом — „землей“. Вследствие наличия емкости между накальной и сетевой обмотками трансформатора выпрямителя, питающего устройство, то же самое относится к нити накала лампы. Поэтому, рассматривая схему для токов высоких частот, можно анод и нить накала лампы соединить на чертеже с „землей“. Тогда суммарная емкость $C_н$ определится как

сумма входной емкости $C_{вх}$, т. е. емкости кабеля следующего каскада, либо другого вида нагрузки междуэлектродных емкостей лампы анод—катод $C_{ак}$, катод — нить накала $C_{кн}$ и последовательного соединения емкости сетка — катод $C_{ск}$ с двумя параллельно соединенными емкостями: емкостью монтажа входной цепи по отношению к „земле" $C_{сз}$ и емкостью сетка — анод лампы $C_{са}$ (фиг. 15,*б*):

$$C_{н} \approx C_{вх} + C_{ак} + C_{кн} + \frac{C_{ск}(C_{са} + C_{сз})}{C_{ск} + C_{са} + C_{сз}}.$$

При определении ширины полосы пропускания катодного повторителя при помощи номограммы, приведенной в конце брошюры, для подсчета емкости $C_{н}$ следует пользоваться этой формулой.



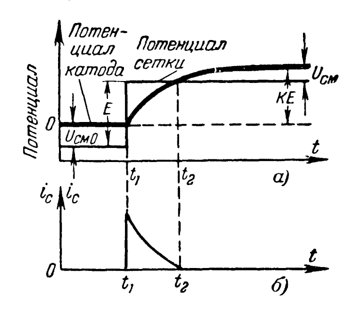
Фиг. 15.
а — схема катодного повторителя с учетом паразитных емкостей; *б* — эквивалентная ей схема.

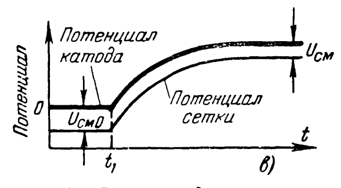
В ряде случаев отдельными составляющими, входящими в эту формулу, можно пренебречь, например, емкостью $C_{са}$ у пентодов.

Вредная роль емкости $C_{н}$ при передаче импульсов связана с постоянной времени цепи катода. Из-за ее наличия потенциал катода лампы катодного повторителя не может меняться мгновенно, так как необходимо некоторое время для заряда или разряда конденсатора $C_{н}$.

Второе обстоятельство, с которым особенно приходится считаться при импульсной работе, заключается в следующем. Эквивалентное внутреннее сопротивление лампы катодного повторителя R_i' можно считать постоянным лишь в пределах линейного участка характеристики

лампы, т. е. для сравнительно небольших сигналов. Если же сигнал достаточно велик, то при работе лампы рабочая точка заметно перемещается по ее характеристике. Поэтому меняется статическая крутизна характеристики лампы S, и следовательно, величина эквивалентного внутреннего сопротивления R_i'. Это обстоятельство приводит к дополнительным искажениям импульса. Оно же, в частности, служит причиной того, что с точки зрения передачи импульсов катодный повторитель является системой несимметричной — его реакция на одинаковый по величине положительный и отрицательный импульс различна. Рассмотрим это подробнее.





Фиг. 16. Временна́я диаграмма потенциалов катода и сетки катодного повторителя для идеального входного положительного импульса (*а*) и случая, когда постоянная времени входной цепи в несколько раз превышает постоянную времени выходной цепи (*в*); *б* — характер изменения сеточного тока для первого случая.

Пусть на вход катодного повторителя воздействует положительный импульс с идеальным передним фронтом. Выясним процессы, происходящие при его передаче.

На фиг. 16, *а* приведена временная диаграмма потенциалов сетки и катода лампы. Первоначальный потенциал катода (пунктирная прямая) будем условно считать нулевым. При отсутствии сигнала положение рабочей точки на характеристике лампы и потенциал ее сетки определяются начальным напряжением смещения $U_{см_0}$. В момент времени t_1, когда на вход усилителя поступает импульс, потенциал сетки лампы мгновенно изменяется на величину, соответствующую его амплитуде E. В то же время потенциал катода не может измениться мгновенно, так как ток, вызванный импульсом, должен зарядить конденсатор $C_н$. Время заряда конденсатора $C_н$ зависит от постоянной времени $\tau_н = R_{вых} \cdot C_н$. По мере того как конденсатор заряжается, растет потенциал катода и в мо-

мент времени, равный t_2, потенциалы сетки и катода станут одинаковыми. Затем потенциал катода начнет превышать потенциал сетки и, наконец, установится новое значение смещения $U_{см}$, величина которого зависит от амплитуды импульса и коэффициента усиления K катодного повторителя.

Из изложенного выше вытекают два обстоятельства. Во-первых, фронт импульса на выходе катодного повторителя искажен по сравнению с фронтом импульса на входе. Во-вторых, в промежуток времени между t_1 и t_2 сетка лампы катодного повторителя при амплитуде импульса, превышающей напряжение смещения $U_{см_0}$, оказывается под положительным потенциалом по отношению к катоду. Вследствие этого возникает сеточный ток, а входное сопротивление каскада резко снижается. Сеточный ток максимален в момент t_1, затем он начинает падать (фиг. 16, *б*). Таким образом, здесь могут иметь место искажения импульса, даже когда его амплитуда невелика.

Природа этих искажений не связана с теми искажениями, на которые указывалось на стр. 14—15, когда речь шла о максимально допустимых входных напряжениях для катодного повторителя.

Мы рассмотрели прохождение идеального переднего фронта импульса. В реальных условиях нарастание импульса происходит не мгновенно, а за какой-то промежуток времени. От величины крутизны фронта импульса зависит характер вносимых катодным повторителем искажений. Если скорость нарастания напряжения на входе больше или такого же порядка, что и скорость нарастания напряжения на выходе, определяемая $\tau_н$, то имеют место описанные выше явления. Если же постоянная времени входной цепи в несколько раз (примерно в пять или больше) превышает постоянную времени $\tau_н$, то напряжение на выходе катодного повторителя достаточно строго следует за напряжением на входе и искажения отсутствуют (фиг. 16, *в*).

Например, при крутизне лампы $S=9$ *ма/в* и сопротивлении нагрузки $R_н=1\,000$ *ом* выходное сопротивление каскада $R_{вых}=100$ *ом*. При емкости нагрузки $C_н=200$ *пф* постоянная времени выходной цепи $\tau_н=100 \cdot 200 \cdot 10^{-12}=$ $=2 \cdot 10^{-8}$ сек. $=0,02$ *мксек*. Следовательно, в рассматри-

ваемом случае при постоянной времени, определяющей форму входного напряжения, равной или большей 0,1 *мксек*, искажений импульса не будет.

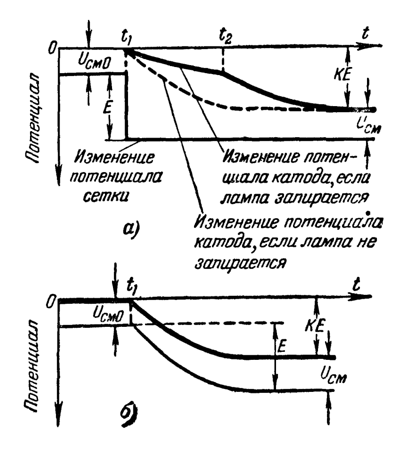
Если постоянная времени выходной цепи велика по сравнению с длительностью заднего фронта передаваемого повторителем импульса, то это также приведет к его искажению (затягиванию). Это затягивание будет тем сильнее, чем в более отрицательную часть характеристики лампы сместится рабочая точка. Максимального значения оно достигнет в том случае, если входное напряжение падает так быстро, что лампа запрется.

При передаче коротких импульсов и заданной величине емкости $C_н$ единственным способом уменьшения постоянной времени $\tau_н$ является уменьшение выходного сопротивления каскада $R_{вых}$. В отдельных случаях с этой целью в катодном повторителе включают параллельно несколько ламп. При этом суммарная крутизна характеристики равна сумме крутизн отдельных ламп, $R_i' = \frac{1}{S}$ заметно падает, $R_{вых}$ понижается, и, следовательно, уменьшается постоянная времени выходной цепи $\tau_н$.

Условия прохождения отрицательного импульса через катодный повторитель оказываются заметно худшими, чем положительного. Пусть на вход каскада поступает отрицательный импульс с идеальным передним фронтом. Как и в предыдущем случае, при отсутствии сигнала положение рабочей точки на характеристике лампы определяется напряжением смещения $U_{см_0}$. В момент времени t_1, когда потенциал сетки лампы скачком меняется на величину E, равную амплитуде импульса, анодный ток сразу падает, но потенциал катода не может измениться мгновенно. С этого момента времени начинает разряжаться конденсатор $C_н$ и благодаря этому падать потенциал катода.

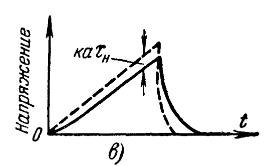
Здесь могут иметь место два случая. Если амплитуда отрицательного импульса достаточно велика для того, чтобы запереть лампу, то конденсатор будет разряжаться не через малую величину $R_{вых}$, а только через одно сопротивление нагрузки $R_н$, и разряд будет идти довольно медленно. Лишь в некоторый момент времени t_2, когда потенциал катода упадет настолько, что лампа откроется (фиг. 17, *а*), разряд будет определяться также и R_i'. Из-за

низкой крутизны характеристики лампы S в начальном участке характеристики R_i' вначале тоже будет велико. По мере уменьшения разности между потенциалами сетки и катода лампы R_i' будет падать, а скорость разряда возрастать. Наконец, установится новое значение напряжения смещения на сетке—$U_{см}$, как и в предыдущем случае, определяемое амплитудой сигнала и коэффициентом усиления каскада K.



Из сказанного ясно, что в рассматриваемом случае будут иметь место большие искажения.

Если амплитуда сигнала E не достигает значения, при котором лампа запирается, то с момента времени t_1 разряд будет определяться постоянной времени $\tau_н$ (пунктирная кривая на фиг. 17,*а*). Искажения здесь будут меньшими, но все же значительными из-за малого значения крутизны при большом отрицательном напряжении на сетке.



Фиг. 17. Временна̀я диаграмма потенциалов катода и сетки катодного повторителя для идеального входного отрицательного импульса (*а*) и случая, когда постоянная времени входной цепи в несколько раз превышает постоянную времени выходной цепи (*б*); *в* — форма напряжения на выходе катодного повторителя при передаче напряжения, растущего по линейному закону.

Так же как и в случае положительного импульса, искажения уменьшаются с уменьшением скорости изменения напряжения на входе каскада, и если постоянная времени, определяющая напряжение входной цепи, в несколько раз превосходит $\tau_н$, то напряжение на выходе будет с достаточной точностью воспроизводить входное напряжение (фиг. 17, *б*).

Явления, связанные с прохождением заднего фронта

отрицательного импульса, аналогичны рассмотренным выше явлениям при прохождении положительного импульса. Потенциал сетки здесь также увеличивается скачком, а рост потенциала катода, связанный с постоянной $\tau_н$, отстает во времени.

В отдельных случаях представляет интерес передача катодным повторителем напряжения, растущего пропорционально времени. Анализ показывает, что при изменении напряжения на входе катодного повторителя по линейному закону $U_{вх}=at$, где a — коэффициент пропорциональности, характеризующий скорость нарастания напряжения в вольтах в секунду, напряжение на его выходе меняется по закону, определяемому следующей формулой:

$$U_{вых}=k\cdot a\,[t-\tau_н\,(1-e^{-t/\tau_н})].$$

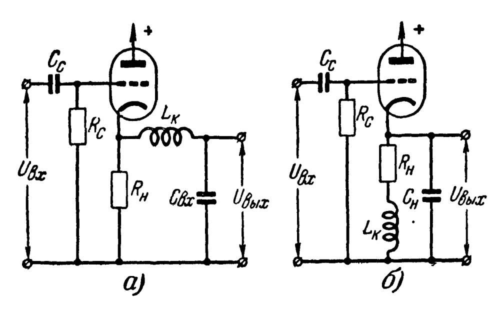
Характер изменения напряжения изображен на фиг. 17 *в*. Пунктирной линией показано изменение на выходе для идеального случая, когда искажения отсутствуют и напряжения $U_{вых}=kU_{вх}$, а сплошной кривой — для реального. Экспоненциальный член в приведенной формуле ввиду быстрого роста дроби $t/\tau_н$ быстро затухает. Поэтому имеющий место в начале процесса более медленный, чем при линейном законе, рост напряжения на выходе катодного повторителя прекращается и оно начинает меняться линейно, отставая в каждый данный момент от идеального выходного напряжения на величину $ka\tau_н$. Из приведенного ясно, что при $\tau_н$, достаточно малом по сравнению с временем T, имеющиеся искажения несущественны.

Интересно сравнить катодный повторитель с усилителем с анодной нагрузкой с точки зрения искажений, вносимых ими при передаче импульса.

В телевизионной и импульсной технике часто пользуются понятием „время установления". Временем установления принято считать то время, в течение которого при идеальном фронте входного импульса (называемом часто единичным сигналом) напряжение на нагрузке изменится от 0,1 до 0,9 своего конечного значения. Если сравнить время установления у обоих типов усилителей, то окажется, что вследствие малого R_i' при равных нагрузках $R_н$ и одинаковых шунтирующих емкостях $C_н$ время

установления у катодного повторителя будет в $(1+SR_н)$ раз меньше.

У усилителя с общим катодом время установления растет пропорционально величине R_a. У катодного повторителя по мере роста сопротивления нагрузки $R_н$ и приближения коэффициента усиления K к единице все сильнее сказывается наличие малого R_i', шунтирующего $R_н$. При величине произведения $SR_н$, много большей единицы, влиянием $R_н$ можно вообще пренебречь. В этом случае предельное время установления катодного повторителя



Фиг. 18. Схемы коррекции частотной характеристики катодного повторителя.

$\tau_{уст}$ оказывается равным $\tau_{уст}=2{,}2\frac{C_н}{S}$. Например, для лампы типа 6Ж4 при емкости нагрузки $C_н=200$ *пф* $\tau_{уст}=2{,}2\frac{200\cdot 10^{-12}}{9\cdot 10^{-3}}=0{,}024$ *мксек*. Время установления реального катодного повторителя с коэффициентом усиления, меньшим единицы, меньше предельного времени установления в $\frac{1}{K}$ раз.

В тех случаях, когда основную часть емкости нагрузки $C_н$ составляет входная емкость следующего каскада $C_{вх}$ и необходимо уменьшить время установления, можно применить коррекцию при помощи катушки индуктивности. Для этой цели катушка $L_к$ включается между катодом и емкостью нагрузки (фиг. 18, *а*). Этот метод компенсации аналогичен методу, применяемому в широкополосных усилителях. При увеличении индуктивности увеличивается задержка сигнала, но время его установления несколько

уменьшается. При дальнейшем увеличении индуктивности появляется выброс на переднем крае импульса, ограничивающий выбор величины $L_к$. Обычно $L_к$ берут равной (или несколько меньше) величине $L=0,5\ C_н \cdot R^2_{вых}$. При таком значении задержка сигналов почти постоянна для широкого диапазона частот, величина выброса составляет 5% от амплитуды, а время установления уменьшается на 30%.

Иногда корректирующую катушку соединяют последовательно с сопротивлением нагрузки $R_н$ (фиг. 18, *б*). Недостатком такой схемы является значительная зависимость корректирующего действия от произведения $SR_н$, определяющего усиление катодного повторителя. С ростом произведения $SR_н$, т. е. с ростом усиления, корректирующее действие индуктивности падает, а с уменьшением — возрастает.

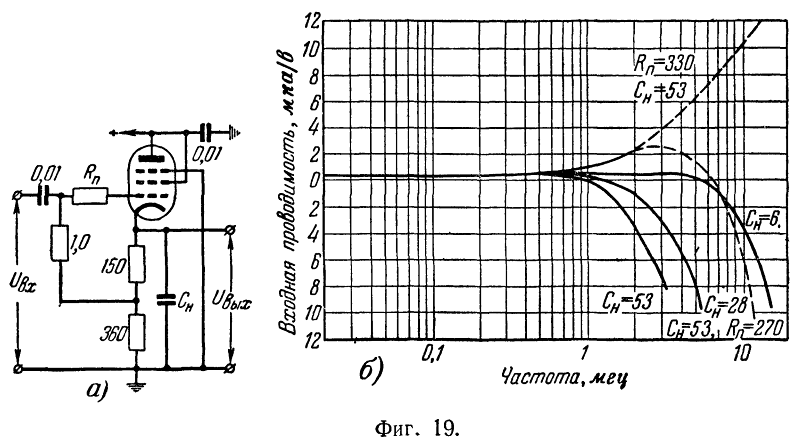
САМОВОЗБУЖДЕНИЕ КАТОДНОГО ПОВТОРИТЕЛЯ

Вследствие того что между сеткой и катодом лампы имеется некоторая емкость, выходная и входная цепи катодного повторителя оказываются связанными между собой. По этой причине при емкостной нагрузке во входную цепь усилителя вносится некоторое отрицательное сопротивление, зависящее от частоты. В результате входная проводимость усилителя падает с частотой и на некоторой критической частоте $f_{кр}$ достигает нуля. На всех частотах выше критической входная проводимость (сопротивление) отрицательна. Если отрицательное входное сопротивление каскада при этом превышает внутреннее сопротивление источника сигнала, то каскад самовозбудится.

Частота $f_{кр}$ при данной крутизне характеристики лампы S и сопротивлении нагрузки $R_н$ тем меньше, чем больше емкость $C_н$.

На фиг. 19,*а* изображена схема катодного повторителя, работающего на лампе с крутизной характеристики 7 *ма/в* и емкостью $C_{ск} = 8$ *пф*. Изменение его входной проводимости в зависимости от частоты для различных величин емкости $C_н$ при сопротивлении $R_п=0$ показано на фиг. 19,*б* сплошными кривыми.

Для прекращения самовозбуждения, в случае его возникновения, в цепь управляющей сетки лампы катодного повторителя включают активное сопротивление $R_п$. Чем меньше это сопротивление, тем лучше, так как при большом значении $R_п$ значительно сужается полоса пропускания катодного повторителя. В случае применения пентодов требуется значительно большее сопротивление $R_п$, чем для триодов, вследствие чего с пентодами заметно ограничивается полоса пропускания. Поэтому в широко-



Фиг. 19.

а — схема предотвращения самовозбуждения катодного повторителя; *б* — кривые изменения входной проводимости в зависимости от частоты.

полосных усилителях, предназначенных для передачи коротких импульсов, обычно применяют триоды либо триодное включение пентодов Так как характеристики пентодов значительно короче, чем триодов, то для передачи импульсов большой амплитуды триоды также предпочтительнее.

При работе на триодах для прекращения самовозбуждения в большинстве случаев достаточно сопротивление $R_п$ порядка одной или нескольких сотен ом. Влияние $R_п$ на изменение входной проводимости катодного повторителя для емкости $C_н = 53$ *пф* показано пунктирными линиями на фиг 19,*б*.

При рассмотрении работы катодного повторителя переменный потенциал анода всюду полагался равным нулю. Для выполнения этого условия емкость конденсатора,

блокирующего анод лампы на землю, должна быть бесконечно большой. На практике, естественно, она конечна и на ней создается некоторое падение переменного напряжения. Поэтому наряду с рассмотренным явлением имеет также место обратная связь через емкость сетка—анод лампы, приводящая к тому, что во входную цепь вносится некоторая положительная составляющая сопротивления. Чем меньше блокирующая емкость $C_б$, тем менее склонен к самовозбуждению каскад и выше при прочих равных условиях $f_{кр}$. Поэтому в ряде случаев без ущерба для работы катодного повторителя емкость этого конденсатора можно несколько уменьшить.

РАСЧЕТ КАТОДНОГО ПОВТОРИТЕЛЯ

Ниже приводятся номограммы для расчета основных параметров катодного повторителя. Эти номограммы позволяют быстро и достаточно точно определить необходимые для большинства практических случаев величины.

Номограмма на фиг. 20 служит для определения коэффициента усиления катодного повторителя, работающего на триоде, а номограмма на фиг. 21 — на пентоде. Номограмма на фиг. 22 позволяет определить выходное сопротивление катодного повторителя и номограмма на фиг. 23— его полосу пропускания, отсчитываемую на уровне 3 *дб*.

Искомая величина находится в точке пересечения средней шкалы линией, соединяющей заданные параметры на двух крайних шкалах.

Пример. Катодный повторитель работает на лампе 6Ж4 в пентодном режиме, $S = 9$ *ма/в*, $R_н = 1\,000$ *ом* Требуется определить K.

Пользуемся номограммой для пентодов Соединяем прямой линией точки на шкалах для S и $R_н$, соответствующие указанным значениям В месте ее пересечения со шкалой коэффициента усиления читаем цифру, соответствующую коэффициенту усиления $K = 0{,}9$.

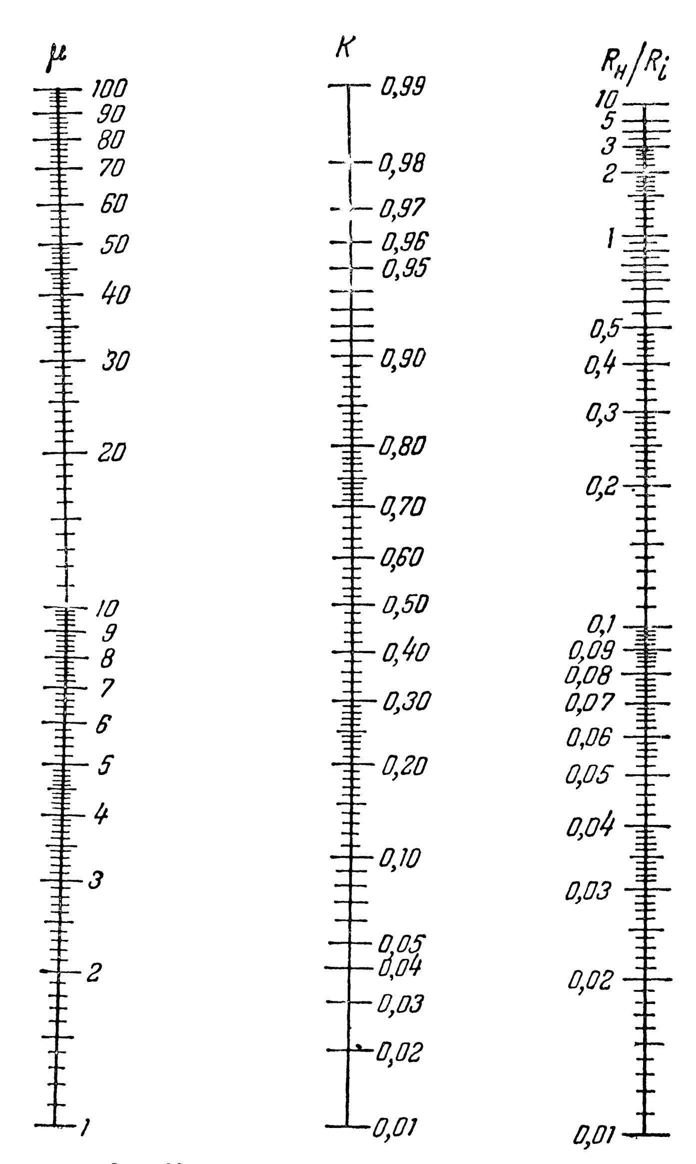
Номограмма на фиг. 24 служит для определения амплитуды максимально допустимого входного импульса в зависимости от времени установления (длительности фронта) этого импульса и выходных параметров каскада.

Вначале по формуле $U_{вх\ макс} = \frac{U_a}{\mu}\left[\frac{1+\frac{R_н}{R_i}(\mu+1)}{\frac{R_i}{R_i}+2}\right]$ следует определить максимально допустимую амплитуду при

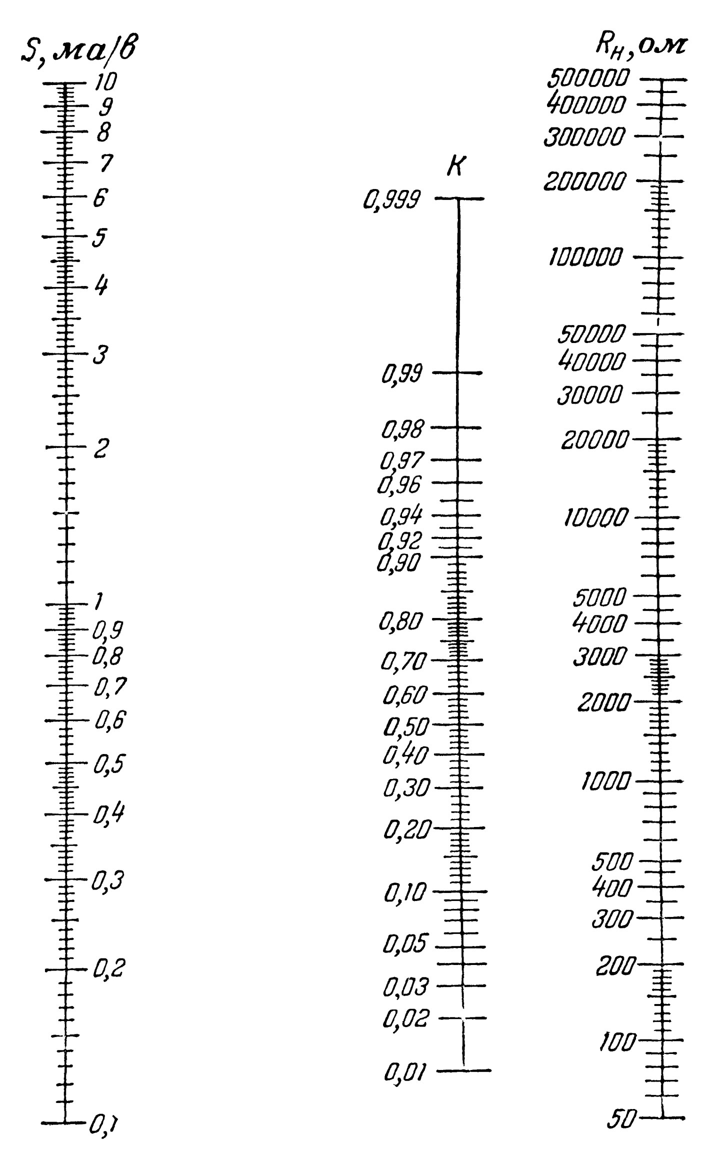
передаче синусоидального напряжения низкой частоты и узнать постоянную времени $T = \frac{C_н R_н}{1 + SR_н}$. Затем нужно найти отношения $\frac{R_н}{R_i}$ и $\frac{t_{уст}}{T}$. Здесь $t_{уст}$ — время установления (длительность фронта) импульса. Значение μ соединяется прямой линией с значением отношения $\frac{R_н}{R_i}$. Пересечение этой линии с жирной прямой дает точку a. Далее из этой точки вверх или вниз проводят прямую до пересечения с кривой, соответствующей имеющему место отношению $\frac{t_{уст}}{T}$. Из точки пересечения с этой кривой опускают перпендикуляр на шкалу, дающую процентное отношение максимально допустимой амплитуды интересующего нас импульса к максимально допустимой амплитуде синусоидального колебания.

Пример. Дано $\mu = 40$, $R_i = 20\,000$ *ом*, $R_н = 1\,000$ *ом*, $C_н = 250$ *пф*, $U_a = 150$ *в*, время установления $t_{уст} = 0{,}42$ *мксек*. Требуется определить допустимую амплитуду входного импульса.

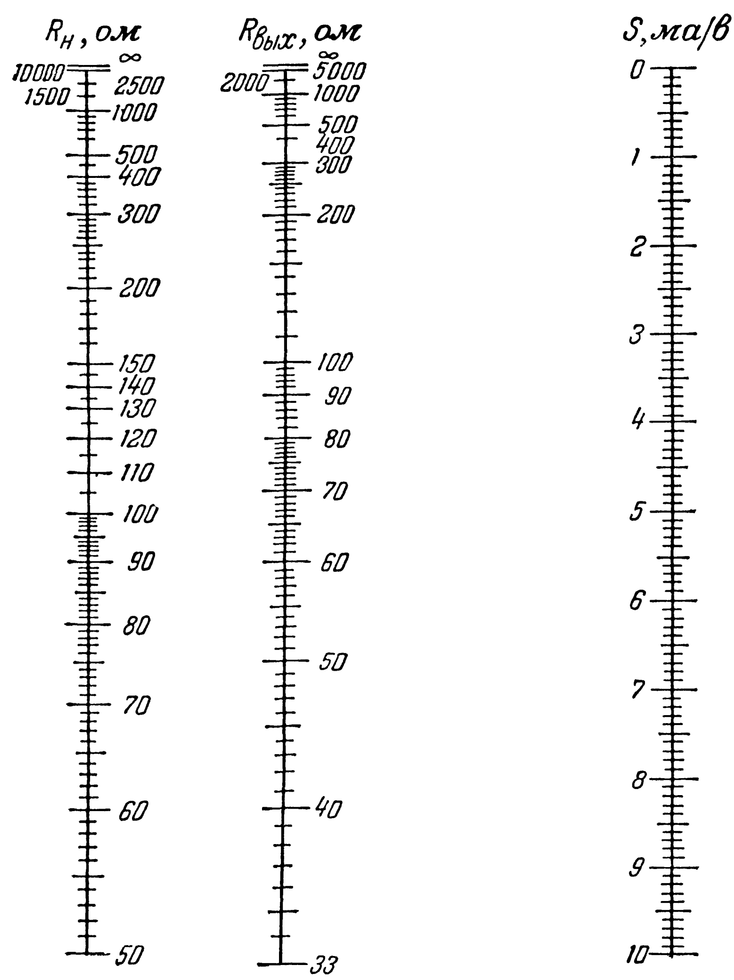
Находим максимальное входное напряжение низкой частоты $U_{вх.макс} = 5{,}6$ *в*. Определяем отношение $\frac{R_н}{R_i} = 0{,}05$. По формуле, связывающей основные параметры лампы, определяем крутизну ее характеристики $S = \frac{\mu}{R_i} = \frac{40}{20\,000} = 2$ *ма/в*. Согласно приведенной выше формуле подсчитываем $T = 0{,}083$ и отношение $\frac{t_{уст}}{T} = 5$. Соединяем на номограмме точку на верхней горизонтальной шкале для $\mu = 40$ с точкой на нижней горизонтальной шкале для $\frac{t}{T} = 0{,}05$. Из точки a пересечения этой прямой с жирной линией восстанавливаем перпендикуляр до пересечения с кривой, соответствующей отношению $\frac{t}{T} = 5$, и из новой точки пересечения проводим горизонтальную линию до пересечения ею шкалы отношения амплитуды импульса к амплитуде синусоидального напряжения низкой частоты. Оно составляет около 72%. Таким образом, допустимая амплитуда импульса равна 4 *в*.



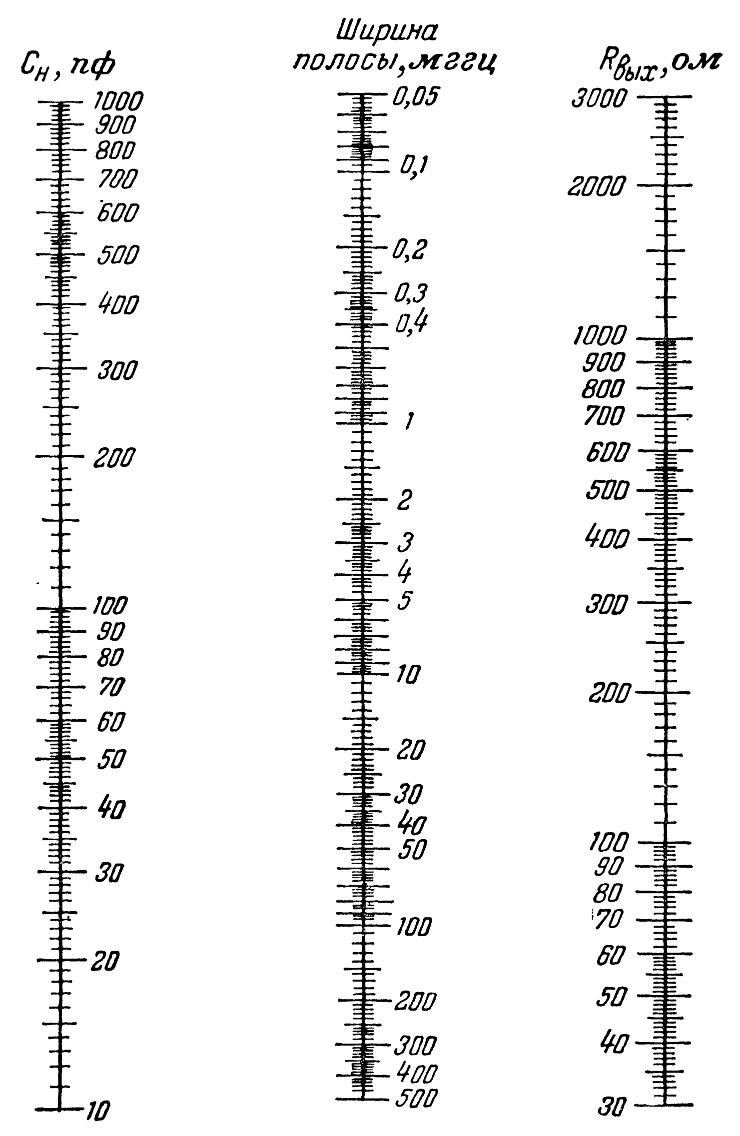
Фиг. 20. Номограмма для расчета коэффициента усиления катодного повторителя, работающего на триоде.



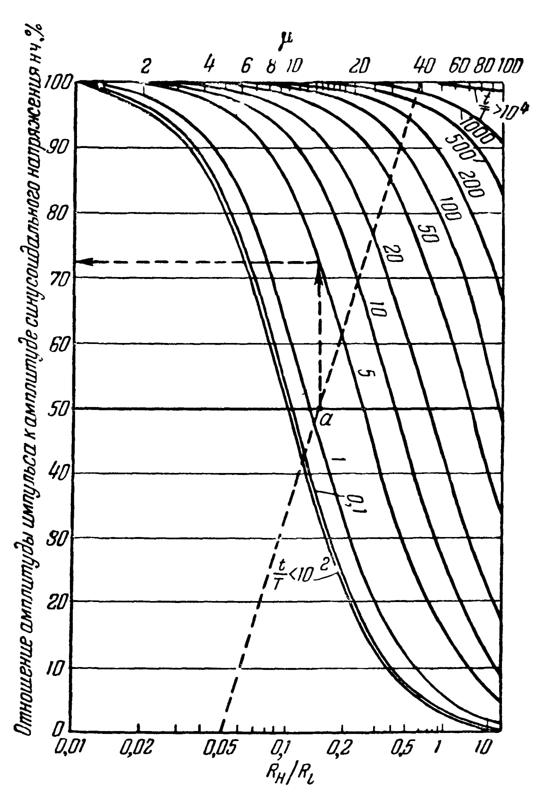
Фиг. 21. Номограмма для расчета коэффициента усиления катодного повторителя, работающего на пентоде.



Фиг 22 Номограмма для расчета выходного сопротивления катодного повторителя



Фиг. 23. Номограмма для расчета ширины полосы пропускания катодного повторителя, измеренной на уровне 3 *дб*.



Фиг 24. Номограмма для определения допустимой амплитуды импульса на входе катодного повторителя.

Цена 1 р. 20 к.

Мне всегда нравились старые, сильно потрёпанные книжки. Потрёпанность книги говорит о её высокой востребованности, а старость о вечно ценном содержании. Всё сказанное в большей степени касается именно технической литературы. Только техническая литература содержит в себе ту великую и полезную информацию, которая не подвластна ни политическим веяниям, ни моде, ни настроениям! Только техническая литература требует от своего автора по истине великих усилий и знаний. Порой требуется опыт целой жизни, чтобы написать небольшую и внешне невзрачную книгу.

К сожалению ни что не вечно в этом мире, книги треплются, разваливаются на отдельные листы, которые затем рвутся в клочья и уходят в никуда. Плюс ко всему орды варваров, которым без разницы, что бросить в костёр или чем вытереть свой зад. Именно их мы можем благодарить за сожженные и растоптанные библиотеки.

Если у Вас есть старая книга или журнал, то не дайте им умереть, отсканируйте их и пришлите мне. Совместными усилиями мы можем создать по истине уникальное и ценное собрание старых технических книг и журналов.

Сайт старой технической литературы:

http://retrolib.narod.ru